



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

SENNI SORRI
CLT-TILAELEMENTTIKERROSTALON
RAKENNUSSUUNNITTELUOHJEISTUS

Diplomityö

Tarkastaja: professori Mikko Malaska
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Talouden ja rakentamisen tiedekun-
taneuvoston kokouksessa 9. marras-
kuuta 2016

TIIVISTELMÄ

SENNI SORRI: CLT-tilaelementtikerrostalon rakennussuunnitteluohjeistus

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 129 sivua, 43 liitesivua

Elokuu 2017

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: professori Mikko Malaska

Avainsanat: arkkitehtisuunnittelu, asuinkerrostalo, asuntosuunnittelu, CLT, puu-kerrostalo, puurakentaminen, rakennesuunnittelu, suunnitteluohje, tilaelementti

Tämä diplomityö käsittelee CLT-tilaelementeistä rakennettuja 3–8-kerroksisia puu-kerrostaloja, joiden käyttötarkoitus on asuminen. Ensimmäinen tämän tyyppinen kerrostalo valmistui Suomeen vuonna 2013. Uuteen rakennejärjestelmään liittyvää tietoa on ollut varsin vähän julkisesti saatavilla ja järjestelmän kehitystyö on kesken, mikä on vaikeuttanut rakennejärjestelmän erityispiirteiden huomioimista suunnittelutyössä.

Työssä koottiin tietoa siitä, millaisilla suunnittelun keinoilla voidaan edistää CLT-tilaelementtikerrostalon kilpailukykyistä toteutettavuutta. Näkökulma painottui rakennus- ja arkkitehtisuunnitteluun sekä näiden suunnittelualojen yhteensovittamiseen. Tulosten pohjalta luotiin ohjekortti, jolla tämä suunnitteluinformaatio voidaan välittää arkkitehdille käyttökelpoisessa muodossa. Ohjekortti suunnattiin erityisesti arkkitehtisuunnittelun luonnosvaiheessa käytettäväksi, joten ohjeistusten sisältö ja esitystapa valittiin tätä tarkoitusta tukevaksi.

Rakennejärjestelmän nuoruudesta johtuen CLT-tilaelementtirakentamisesta oli suhteellisen vähän saatavilla kirjallista tietoa. Siksi työn lähdeaineistoa kerättiin myös haastattelujen avulla. Haastateltavat olivat CLT-tilaelementtikerrostalohankkeiden arkkitehti- ja rakennesuunnittelijoita, rakennuttajien edustajia sekä tilaelementtitehtaiden edustajia. Lisäksi työn tausta-aineistona käytettiin vuosina 2013–2017 toteutettujen CLT-tilaelementtikerrostalojen suunnitelma-asiakirjoja. Aineisto kattaa kaikki diplomityön kirjoitusajankohtaan mennessä Suomeen valmistuneet CLT-tilaelementtikerrostalot.

Kootun tiedon perusteella tunnistettiin useita arkkitehtisuunnittelun keinoja, joilla CLT-tilaelementtikerrostalon toteutettavuutta pystytään edistämään. Yksi keino on tilaelementtijako, joka käsittää tilaelementtien sopivan maksimikoon, muodon, painon, kappalemäärän ja toistuvuuden määrittämisen. Toinen keino on märkätilojen, keittiön ja hormien tarkoituksenmukainen sijoittelu. Kolmas keino on rakennuksen jäykistyksen huomioiminen kerrospohjan jäsentelyssä. Neljäntenä tekijänä esiin nousi tilaelementtien aukotus, jossa tulisi huomioida rakenteiden kestävyys ja tilaelementtien nostettavuus.

Lisäksi nähtiin keskeiseksi rakennejärjestelmään liittyvän yleistiedon lisääminen, joten ohjekorttiin sisällytettiin paljon yleistä tietoa rakennejärjestelmän ominaisuuksista. Siten ohjekortti toimii tietolähteenä myös muille suunnittelijoille ja hankkeiden osapuolille sekä opiskelijoille.

ABSTRACT

SENNI SORRI: Design instructions for CLT multi-storey modular element buildings

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 129 pages, 43 Appendix pages

August 2017

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Structural Engineering

Examiner: Professor Mikko Malaska

Keywords: architectural design, CLT, design instructions, housing design, modular construction, modular element, structural design, timber construction

This master's thesis deals with 3 - 8 storey CLT modular element buildings built for residential use. In Finland the first building of this type was completed in 2013. Modular CLT construction has been under development and the system is rather unfamiliar among the designers, which makes it difficult to recognize the special characteristics of the system.

The objective of this study was to find out what kind of architectural design solutions advantage the competitive feasibility of modular CLT modular element buildings. The focus was on architectural, structural and design coordination issues. On the basis of the results, design instructions for architects were created. The target of the instructions was to increase architects' awareness of the special requirements and features of the construction system at an early stage of the design work. The contents and the manner of presentation were chosen accordingly.

Due to the lack of published information, a significant part of the source material was gathered by interviews. The interviewees were architects, structural engineers and construction consultants involved in CLT modular element projects, as well as representatives of modular element factories. In addition, design documents of modular buildings were utilized as source material. The documents covered all the CLT multi-storey modular element buildings which were completed in Finland by August 2017.

When it comes to competitive feasibility of modular CLT construction, many architectural design factors were identified in the study. The first factor was the reasonable size, shape, weight, amount and repetition of modular elements. The second factor identified was the functional placing of bathrooms, kitchens and service risers. The third factor was the placing of bracing walls in the floor plan. The fourth factor that arose was the size and placing of openings, considering both lifting of the modular element and loads of the completed structure.

It was seen important that the design instructions would provide general information about the construction system. Thus the design instructions can also serve other designers, project parties and students as a source of information.

ALKUSANAT

20.8.2007 alkoi elämässäni ajanjakso, jonka kiintopisteenä on ollut Tampereen teknillinen yliopisto. Arkkitehtuurista alkanut opiskelu-ura laajeni parin vuoden kuluttua myös rakennustekniikan puolelle. Syntyi unelma rakennesuunnittelun ja arkkitehtuurin osaamisalueiden yhdistämisestä. Aloitin lukiossa väliin jääneen fysiikan opiskelun täysin nollasta - kurssille mennessäni en edes tiennyt, että voiman yksikkö on newton. Sain kuitenkin kirittyä tiedot arkkitehtuopinintojen ohessa sille tasolle, että minut hyväksyttiin keväällä 2012 suoraan rakennustekniikan diplomi-insinöörin koulutusohjelmaan ilman kandidaattia.

Marraskuussa 2012 valmistuin arkkitehdiksi - päivä äitiyslomalle jäämisen jälkeen. Kovin kauan en kuitenkaan pystynyt olemaan erossa TTY:stä, vaan seuraavalle kurssille suuntasin jo kesällä 2013. Siitä asti perheessämme on eletty ruuhkavuosia, jotka ovat sisältäneet melkoista tasapainottelua perheen, työn, opiskelun ja yrittäjyyden välillä.

TTY:stä on vuosien saatossa tullut minulle kuin toinen koti. Sen käytäviä olen kulkenut monessa eri roolissa: opiskelijana, opettajana, yhdistyksen vastuunkantajana, suunnittelutoimiston edustajana, asiakkaana, potilaana, ystävänä, äitinä ja puolisona. Siellä olen luonut pohjan osaamiselleni ja ammatilliselle identiteetilleni. Siellä olen valvonut ja nukkunut monet yöt harjoitustöiden ääressä. Siellä olen kokenut yhteenkuuluvuutta muiden opiskelijoiden kanssa Tampereen kristittyjen teekkarien toiminnassa. Siellä olen tavannut elämäni miehen, tehnyt fysiikan mittauksia vauva kainalossa ja istunut tyttäreni kanssa iltaisin tietokoneluokassa eväiden ja lastenohjelmien voimalla. Siellä olen syönyt kenties enemmän lounaita kuin Tampereen-kodeissani yhteensä.

10 vuoden mittainen matkani TTY:n kanssa päättyy elokuussa 2017, kun vastaanotan diplomi-insinöörin tutkintotodistuksen. Tie tähän pisteeseen ei ollut helppo, mutta onnistumisen ilo unelman saavuttamisesta on sitäkin suurempi. Tämä ei olisi ollut mahdollista ilman monia tukijoita ja taustajoukkoja.

Diplomityön laajuus on 30 opintopistettä, mikä vastaa noin 800 työtuntia. Aivan tähän en yltänyt, mutta olen kiitollinen siitä, että minun ei tarvinnut tehdä kaikkia 790 työtuntia omalla kustannuksellani. Diplomityöni taloudellisesta tukemisesta kiitos kuuluu Rakennustietosäätiö RTS:lle sekä työnantajalleni Sweco Rakennetekniikka Oy:lle.

Olen iloinen siitä, että sain diplomityöni ohjaajaksi professori Mikko Malaskan, jonka kanssa käytyjen keskustelujen ansiosta työn rakenne pysyi koossa koko projektin ajan. Kiitokset asiantuntevasta ja kannustavasta ohjauksesta.

Diplomityötä kirjoittaessa olin siinä etuoikeutetussa asemassa, että käytettävissäni oli Suomen paras asiantuntemus CLT-tilaelementtikerrostalojen rakennesuunnittelusta. Suuri kiitos siis Lauri Lepikonmäelle, joka toimi työni ohjaajana Sweco Rakennetek-

niikka Oy:n puolesta. Lisäksi erityiskiitos työkavereilleni Anssille ja Villelle, jotka myöskin olivat omista työkiireistään huolimatta aina valmiita vastaamaan kysymyksiini ja antamaan laajan asiantuntemuksensa käyttööni. Kiitos myös muille haastatteluihin osallistuneille sekä työtä eri vaiheissa kommentoineille. Arvostan vaivannäköänne sekä antamaanne aikaa.

Kiitokset vanhemmilleni Minnalle ja Pekalle kaikesta siitä tuesta ja mukana elämisestä, jota olen teiltä vuosien varrella saanut. Lastenhoidosta on ollut suuri apu. Kiitokset myös ystävälleni Paulalle monen lastenhoitopulman ratkaisemisesta ja tilanteen pelastamisesta.

Diplomityön projektinhallinnan onnistumisesta suurin kiitos kuuluu 4-vuotiaalle tyttärelleni Pionille. Sinä olet opettanut minulle, että työt tehdään silloin kun siihen on mahdollisuus, eikä silloin kun huvittaa. Ja että joka päivä tehdään myös niitä asioita, jotka huvittavat. Olet elämäni ilo ja valo.

Tärkein tuki kaikissa opintojeni vaiheissa olet kuitenkin ollut sinä, Jaakko. Ihmettelen sitä, kuinka olet jaksanut osoittaa kiinnostusta työtäni kohtaan ja nähnyt vaivaa sen kommentoimisessa. Tieteellisen kirjoittamisen asiantuntemuksestasi oli suuri apu diplomityön kirjoittamisessa. Ennen kaikkea olet kannustanut minua toteuttamaan unelmiani ja monessa tilanteessa olet luopunut omasta mukavuudestasi ja ajastasi tehdäksesi sen mahdolliseksi. Kiitos.

Mikkelissä, 28.7.2017

Senni Sorri

SISÄLLYS

1.	JOHDANTO	1
1.1	Tutkimuksen tausta	1
1.2	Tutkimuksen tavoite ja tutkimuskysymykset	2
1.3	Työn rajaukset	3
1.4	Aineistot ja tutkimusmenetelmät	4
1.5	Työn rakenne	8
2.	CLT-TILAELEMENTTIKERROSTALON RAKENNEJÄRJESTELMÄ	10
2.1	CLT eli ristiinliimattu massiivipuulevy	11
2.1.1	Levytyypit	11
2.1.2	Materiaaliominaisuudet	13
2.2	Rakennejärjestelmän kuvaus	14
2.2.1	CLT-tilaelementin rakenne	14
2.2.2	CLT-tilaelementtikerrostalon rakenne	17
2.3	Tilaelementtirakentamisen periaate	21
2.3.1	Tilaelementtirakentamisen edut	22
2.3.2	Tilaelementtirakentamisen rajoitteet ja haasteet	24
3.	RAKENNESUUNNITTELUN ERITYISKYSYMYKSIÄ	27
3.1	CLT:n mitoitus lappeellaan	28
3.1.1	CLT:n taivutusmitoitus lappeellaan	28
3.1.2	CLT:n leikkausmitoitus lappeellaan	31
3.1.3	Kävelyn aiheuttama välipohjien värähtely	32
3.1.4	Tukipainekestävyys	34
3.2	CLT:n mitoitus syrjällä	34
3.2.1	CLT:n taivutusmitoitus syrjällä	35
3.2.2	CLT:n leikkausmitoitus syrjällä	35
3.2.3	CLT:n normaalivoimamitoitus syrjällä	38
3.3	Paloturvallisuus	39
3.3.1	Pintaluokat ja suojaverhoukset	40
3.3.2	Palon leviämisen rajoittaminen	43
3.3.3	Kantavien rakenteiden palomitoitus	44
3.3.4	Taulukkoarvoista poikkeaminen	47
3.4	Tilaelementtikerrostalon jäykistysperiaate	48
3.4.1	Jäykistävät seinät	48
3.4.2	Välipohjataso jäykistys	51
3.5	Tilaelementtirungon toiminta käyttörajatilassa	53
3.5.1	Rakennusrungon vaakasiirtymä	53
3.5.2	Tuulen aiheuttama värähtely	54
3.5.3	Rakennusrungon painuma	59

3.6	Rakentamisprosessin huomioiminen suunnittelussa	60
3.6.1	Tilaelementin kuljetus	61
3.6.2	Tilaelementin nosto	64
3.6.3	Asennusjärjestys työmaalla	67
4.	ARKKITEHTISUUNNITTELUN ERITYISKYSYMYKSIÄ	71
4.1	Näkökulmia tilaelementtiarkkitehtuuriin	72
4.1.1	Tilaelementti arkkitehtonisena aiheena	72
4.1.2	Teollisesti tuotettu arkkitehtuuri	74
4.2	Pohjapiirroksen muodostaminen tilaelementeistä	76
4.2.1	Tilaelementin mittojen vaikutus asuntosuunnitteluun	76
4.2.2	Tilaelementtijako ja toistuvuus	77
4.2.3	Porrashuone	79
4.2.4	Tilojen sijoittelu talotekniikan näkökulmasta	82
4.3	Puun käyttö pintamateriaalina	83
4.3.1	Puujulkisivujen suunnittelu	85
4.3.2	Puujulkisivun pitkäaikaiskestävyys	87
4.3.3	Puun käyttö sisäpinnoissa	90
5.	RAKENNUSSUUNNITTELUOHJEIDEN MUODOSTAMINEN	91
5.1	Ohje 1: CLT	92
5.2	Ohje 2: Tilaelementtirakentaminen	92
5.3	Ohje 3: Tilaelementin rakenne	93
5.4	Ohje 4: Tilaelementtikerrostalon rakenne	93
5.5	Ohje 5: Paloturvallisuus	94
5.6	Ohje 6: Tilaelementin koko ja muoto	95
5.6.1	Tilaelementin muoto	95
5.6.2	Valmistuksen mittarajoitteet	96
5.6.3	Kuljetuksen mittarajoitteet	97
5.6.4	Tilaelementin paino	97
5.7	Ohje 7: Asuntopohjien muodostaminen	101
5.7.1	Tilaelementtijako	101
5.7.2	Asunnon muodostaminen kahdesta tilaelementistä	102
5.7.3	Talotekniikka	102
5.8	Ohje 8: Kerrospohjan muodostaminen	104
5.9	Ohje 9: Aukotus	106
5.9.1	Aukot kantavissa CLT-seinissä	107
5.9.2	Noston vaikutus tilaelementin aukotukseen	108
5.9.3	Aukkojen etäisyys toisistaan	111
5.9.4	Aukot jäykistävässä CLT-seinissä	114
5.10	Ohje 10: Julkisivut	115

6.	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	116
6.1	Keskeiset havainnot.....	116
6.2	Suunnitteluohjeen luotettavuuden arviointi	117
6.3	Kehitys- ja jatkotutkimusaiheita	118
6.4	Lopuksi.....	119
	LÄHTEET.....	121

LIITE A: Haastattelukysymykset

LIITE B: CLT-tilaelementtikerrostalon rakennussuunnittelun ohjekortti

1. JOHDANTO

Arkkitehti on tilojen, toimintojen ja estetiikan asiantuntija. Luonnossuunnitteluvaiheessa rakenteet ovat arkkitehdille ääriviivoja, joilla rajataan tiloja, rakennusmassoja, näkymiä ja tunnelmia. Asuntosuunnittelijalla keskiössä on ihminen - hänen kokemuksensa, aistinsa, toimintonsa ja viihtyvyytensä.

Arkkitehdin suurin ammattitaito on kyky luovaan prosessiin, jossa valtavasta reunaehdojen ja keskenään ristiriitaisten vaatimusten joukosta työtetään kaikkia osapuolia tyydyttävä kokonaisratkaisu. Rakennuksen toiminnallisuuden, tilatehokkuuden, sopusuhtaisuuden, turvallisuuden ja toimivan mitoituksen aikaansaaminen vaatii monimutkaisten kokonaisuuksien hallitsemista ja yhteensovittamista.

Rakennejärjestelmän mahdollisuudet ja rajoitteet ovat yksi niistä osa-alueista, jotka arkkitehti ottaa huomioon kokonaisuutta muodostaessaan. Jos arkkitehdilla on käyttökelpoisessa muodossa olevaa informaatiota rakennejärjestelmän ominaisuuksista, on suunnitelmaa helpompi viedä eteenpäin rakennejärjestelmän ehdoilla. Uusien rakennejärjestelmien kohdalla rakenteisiin liittyvää tietoa voi kuitenkin olla vaikeasti saatavilla. Tiedon puute voi johtaa useisiin suunnitelmien muutoskierroksiin ennen kuin päästään toteutuskelpoiseen ratkaisuun.

1.1 Tutkimuksen tausta

CLT:stä eli ristiinliimatusta massiivipuulevystä rakennettuja tilaelementtikerrostaloja on alettu toteuttaa Suomeen vasta 2010-luvulla. Uuteen rakennejärjestelmään liittyvää tietoa on vasta varsin vähän saatavilla ja järjestelmän kehitystyö on kesken. Palomääräykset ovat sallineet 5-8-kerroksisten puukerrostalojen rakentamisen vasta vuodesta 2011 lähtien (RakMK E1 2011), joten erityisesti korkeaan rakentamiseen soveltuvat ratkaisut ovat kehittämisen kohteena.



Kuva 1.1. Seinäjoelle osoitteeseen Lintuviita 2 valmistui vuonna 2013 Suomen ensimmäinen CLT-tilaelementtikerrostalo. (Kuva: Lauri Lepikonmäki)

CLT-tilaelementtikerrostalohankkeissa on ilmennyt monia haasteita, joista kenties suurimmat ovat liittyneet suunnitteluun. Vasta harvoilla suunnittelijoilla on kokemusta puukerrostalorakentamisesta, tilaelementtitekniikasta ja CLT-materiaalista. Diplomi-työn aihetta valittaessa heräsi ajatus siitä, olisiko CLT-tilaelementtikerrostalon suunnitteluun liittyviä haasteita mahdollista helpottaa arkkitehtisuunnittelun ohjeistuksen avulla. Jos CLT-tilaelementtijärjestelmä ei ole suunnittelijalle entuudestaan tuttu, voisi ohjekortti tarjota tarpeelliset perustiedot rakennejärjestelmästä ja ohjata suunnittelijaa huomioimaan rakennejärjestelmän erityispiirteet ja toteutettavuuden kannalta keskeiset tekijät jo luonnossuunnittelun alkuvaiheessa. Kun arkkitehtisuunnitelma on alusta alkaen laadittu rakennejärjestelmän ehdoilla, säästetään suunnitelman muutoskierroksiin käytettyä aikaa ja ennen kaikkea vaikeita ja kalliita rakenneratkaisuja saadaan vältettyä.

1.2 Tutkimuksen tavoite ja tutkimuskysymykset

Tässä työssä tarkastellaan CLT-tilaelementtikerrostalon arkkitehtisuunnitteluun vaikuttavia erityispiirteitä erityisesti teollisen esivalmistuksen ja rakennesuunnittelun näkökulmasta. Työssä pyritään löytämään vastaukset seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- 1) Millaisilla suunnittelun keinoilla voidaan edistää CLT-tilaelementtikerrostalon kilpailukykyistä toteutettavuutta

ja

- 2) miten tämä suunnitteluinformaatio saadaan välitettyä arkkitehdille helposti sovellettavassa muodossa jo suunnittelun alkuvaiheessa.

Tavoitteena on siis löytää ne keskeiset osa-alueet, joista olisi tärkeää olla olemassa suunnitteluinformaatiota ja koota se arkkitehtisuunnittelun kannalta käyttökelpoiseen muotoon. Kilpailukykyisellä toteutettavuudella ei tarkoiteta tässä pelkästään kustannustehokkuutta, vaan työssä pyritään ottamaan huomioon myös arkkitehtonisten laatutekijöiden vaikutus rakennejärjestelmän menestymismahdollisuuksiin.

1.3 Työn rajaukset

CLT-tilaelementtirakentaminen perustuu tehtaalla pitkälle esivalmistettuihin rakennuskomponentteihin. CLT-tilaelementtikerrostalon kilpailukykyistä toteutettavuutta pystytään edistämään monenlaisilla tehdastuotannon tehostamiseen ja projektin organisointiin liittyvillä toimilla. Tässä työssä keskitytään kuitenkin vain niihin tekijöihin, joilla CLT-tilaelementtikerrostalon toteutettavuutta pystytään parantamaan *rakenteellisten ja arkkitehtonisten suunnitteluratkaisujen keinoin*.

Tilaelementtitekniikkaa käytetään usein siirtokelpoisten ja väliaikaisten rakennusten toteuttamistapana. Tässä työssä käsitellään kuitenkin ainoastaan pysyviksi tarkoitettuja rakennuksia. Rakennustyypille on tehty seuraavat rajaukset:

- 1) **Rakennus on rakennettu tilaelementeistä, joiden pääasiallinen runkomateriaali on ristiinliimattu massiivipuulevy (CLT).** Tilaelementtejä voidaan puun ohella tehdä myös muista runkomateriaaleista kuten teräksestä ja betonista. Puu-tilaelementtejä voidaan tehdä massiivipuisina, rankarakenteisina tai näiden yhdistelminä. Tässä työssä käsitellään ainoastaan puurakenteisia tilaelementtejä, joiden pääasiallisena runkomateriaalina on CLT.
- 2) **Rakennuksen korkeus on 3–8 kerrosta.** Työn tarkoituksena on paneutua monikerroksisen rakennuksen kokoluokassa esiin nouseviin suunnittelun haasteisiin, joten 1- ja 2-kerroksiset rakennukset on rajattu työn ulkopuolelle. Työn kirjoittamishetkellä voimassa olevat palomääräykset rajoittavat puukerrostalon enimmäiskorkeuden kahdeksaan kerrokseen, joten kerrosluvun yläraja on määritetty tämän mukaisesti.
- 3) **Rakennuksen käyttötarkoitus on asuminen.** Rakennuksen käyttötarkoitus vaikuttaa suuresti rakennuksen pohjaratkaisuun ja rakenteellisiin valintoihin, jo-

ten käyttötarkoituksesta riippumatonta suunnitteluohjeistusta olisi vaikea laatia. Tilaelementtitekniikka soveltuu tilayksiköiden pienestä koosta johtuen hyvin asuinrakentamiseen ja asuinkäyttö on otettu tässä työssä tarkastelun lähtökohdaksi.

CLT-tilaelementtikerrostalon suunnitteluun liittyy valtava määrä huomioon otettavia tekijöitä, joista kaikista voisi laatia omat suunnitteluohjeensa. Ohjeistuksen laatimisessa jouduttiin siksi tekemään jo alussa rajaukset siitä, mihin ohjeistuksella tähdätään. Ohjeistukselle valittiin seuraavat lähtökohdat:

- 1) **Ohjeistuksen pääasiallisena kohderyhmänä ovat arkkitehdit.** Ohjeet on laadittu erityisesti arkkitehdin tarpeisiin, mutta niistä voivat hyötyä myös muut suunnittelijat ja hankkeiden osapuolet sekä opiskelijat.
- 2) **Ohjeistukset kohdistuvat arkkitehtisuunnittelun luonnosvaiheeseen, jossa muodostetaan rakennuksen rungon yleismuoto, tilajärjestelyt sekä sisä- ja ulkoarkkitehtuurin ilme.** Ohjeistuksessa keskitytään rakennusrungon yleisratkaisun muodostamiseen, sillä sen onnistuminen on edellytyksenä tarkemman tason suunnittelun onnistumiselle. Kun perusasiat ovat kunnossa, ovat yksityiskohdatkin ratkaistavissa. Siksi myöhemmässä suunnittelun vaiheessa esiin nousevat asiat, kuten detajiiikka, tarkempi akustinen suunnittelu sekä lämpö- ja kosteustekniikka on rajattu työn ulkopuolelle. Pääpaino on kantavan rungon dimensioissa, tilaelementtien ja tilojen sijoittelussa sekä tilavarauksissa. Myös julkisivujen suunnittelua ja palomääräyksiä käsitellään siinä laajuudessa kuin se on tarpeen rakennuksen sisä- ja ulkoarkkitehtuurin luonnossuunnittelun kannalta.
- 3) **Ohjeistusta käytetään Suomessa.** Suunnitteluohjeet on laadittu Suomen olosuhteisiin ja rakentamismääräyksiin sopiviksi. Rakennerratkaisujen lähtökohdaksi on otettu Suomeen aikaisemmin toteutettujen CLT-tilaelementtikerrostalojen ratkaisut.

Kaikille asuinkerrostaloille yhteisiä suunnittelun reunaehtoja, kuten paloturvallisuussuunnittelun perusteita, ei nähty mielekkääksi kerrata suunnitteluohjeessa. Sen sijaan nähtiin olennaiseksi tuoda esiin niitä suunnitteluun liittyviä tekijöitä, jotka ovat CLT-tilaelementtikerrostalossa tavanomaisesta poikkeavia ja saattavat olla suunnittelijalle uusia. Näitä ovat esimerkiksi puukerrostalolle asetetut suojaverhous- ja pintaluokkavaatimukset. Puukerrostalolla ja tilaelementtikerrostalolla viitataan tässä työssä kerrostaloihin, joiden käyttötarkoituksena on asuminen.

1.4 Aineistot ja tutkimusmenetelmät

CLT-tilaelementtitekniikka on vielä niin uutta, että kirjallisia lähteitä on varsin vähän saatavilla. Koska aiheesta julkaistu kirjallisuus on rajallista, ovat tutkimuksessa keskei-

sessä osassa olleet asiantuntijahaastattelut. Haastatteluja tehtiin arkkitehti- ja rakenne-suunnittelijoille sekä rakennuttajille ja tilaelementtivalmistajien edustajille. Haastattelut toteutettiin joko puhelinhaastatteluina kysymysrunгон pohjalta tai kirjallisina haastatteluina sähköpostitse. Puhelinhaastatteluista laadittiin kirjalliset muistiot, jotka lähetettiin sähköpostitse haastateltavien tarkastettaviksi. Haastatteluissa pyrittiin kartoittamaan ennen kaikkea suunnitteluprosessin ongelmakohtia sekä löytämään ne aihealueet, joista tarvittaisiin suunnitteluohjeistusta. Haastattelulähteet on esitetty taulukossa 1.1.

Taulukko 1.1. Työssä käytetyt haastattelulähteet.

Haastateltava	Haastattelun tyyppi ja päivämäärä	Haastattelun aihe
Rakennuttajien edustajat		
Jouni Liimatainen Toimitusjohtaja Jwood Ky	Puhelinhaastattelu 12.8.2016 Muistio tarkastettu ja täydennetty sähköpostitse 15.8.2016	CLT-tilaelementtirakentamisen mahdollisuudet ja rajoitteet rakennuttajan näkökulmasta (kysymysrunko 1, liite A)
Keijo Ullakko Hallituksen puheenjohtaja Rakennus MIRE Oy	Puhelinhaastattelu 29.9.2016 Muistio lähetetty tarkastettavaksi sähköpostitse	CLT-tilaelementtirakentamisen mahdollisuudet ja rajoitteet rakennuttajan näkökulmasta (kysymysrunko 1, liite A)
Arkkitehtisuunnittelijat		
Arkkitehti 1	Puhelinhaastattelu 4.10.2016 Muistio lähetetty tarkastettavaksi sähköpostitse	CLT-tilaelementtitekniikan vaikutukset arkkitehtisuunnitteluun (kysymysrunko 2, liite A)
Arkkitehti 2	Sähköpostihaastattelu 10.10.2016	CLT-tilaelementtitekniikan vaikutukset arkkitehtisuunnitteluun (kysymysrunko 2, liite A)
Matti Takala Arkkitehtitoimisto Matti Takala	Sähköpostihaastattelu 30.11.2016	CLT-tilaelementtitekniikan vaikutukset arkkitehtisuunnitteluun (kysymysrunko 3, liite A)

Juha Pakkala OOPEAA Office for Peripheral Architecture	Sähköpostihaastattelu 2.12.2016	CLT-tilaelementtitekniikan vaikutukset arkkitehtisuunnitteluun (kysymysrunko 3, liite A)
Arkkitehti 3	Sähköpostihaastattelu 19.12.2016	CLT-tilaelementtitekniikan vaikutukset arkkitehtisuunnitteluun (kysymysrunko 3, liite A)

Rakennesuunnittelijat

Lauri Lepikonmäki Sweco Rakennetekniikka	Sähköpostihaastattelu 21.9.2016	CLT-tilaelementtikerrostalon käyttörajatilamitoitus (kysymysrunko 4, liite A)
Ville Lehtimäki Sweco Rakennetekniikka	Sähköpostihaastattelu 22.9.2016	CLT-tilaelementtikerrostalon käyttörajatilamitoitus (kysymysrunko 4, liite A)
Lauri Lepikonmäki Sweco Rakennetekniikka	Sähköpostihaastattelu 30.11.2016	CLT-tilaelementtikerrostalon jäykistys (kysymysrunko 5, liite A)
Anssi Hentinen Sweco Rakennetekniikka	Sähköpostihaastattelu 1.12.2016	CLT-tilaelementtikerrostalon jäykistys (kysymysrunko 5, liite A)
Anssi Hentinen Sweco Rakennetekniikka	Sähköpostihaastattelu 9.12.2016	CLT-tilaelementin nosto (kysymysrunko 6, liite A)

Tilaelementtivalmistajien edustajat

Tilaelementtitehtaan 1 edustaja	Sähköpostihaastattelu 9.12.2016	Tilaelementin maksimimitat ja maksimipaino sekä tuotantoprosessiin liittyviä asioita (kysymysrunko 7, liite A)
Tilaelementtitehtaan 2 edustaja	Suullinen tiedonanto 23.5.2017 Täydennetty sähköpostitse 23.5.2017	Tilaelementin maksimimitat ja maksimipaino

Haastattelujen lisäksi tärkeässä roolissa olivat Suomeen toteutettujen CLT-tilaelementtikerrostalojen suunnitelmat. Kohdeaineiston perusteella kartoitettiin ja kuvattiin Suomessa käytetyn CLT-tilaelementtijärjestelmän rakenteellisia ja arkkitehtoni-

sia ratkaisuja. Kohdeaineiston perusteella tehtiin yleistyksiä sitä, millainen on tyypillinen suomalainen CLT-tilaelementtikerrostalo ja muodostettiin suunnitteluohjeet tällaiseen rakennustyyppiin soveltuvaksi. Työn taustamateriaalina käytetty kohdeaineisto on esitetty taulukossa 1.2. Aineisto kattaa kaikki diplomityön kirjoitusajankohtaan mennessä Suomeen valmistuneet CLT-tilaelementtikerrostalot.

Taulukko 1.2. Luettelo työn taustamateriaalina käytetyistä CLT-tilaelementtikohteiden suunnitteluasiakirjoista.

Kohde ja valmistumisvuosi	Tilaelementtien toimittaja	Käytettävissä olleet suunnitelmat
Lintuviita Lintuviita 2, Seinäjoki 2013	Stora Enso	Arkkitehtisuunnitelmat Rakennesuunnitelmat
Kiinteistö Oy Turun palvelukoti Ruissalontie 19, Turku 2014	Stora Enso	Arkkitehtisuunnitelmat Rakennesuunnitelmat
As. Oy Jyväskylän Puukuokka 1 Syöttäjänkatu 1, Jyväskylä 2014	Stora Enso	Arkkitehtisuunnitelmat Rakennesuunnitelmat
Eskolantien puukerrostalot Eskolantie 4 ja 6, Helsinki 2015	Stora Enso	Arkkitehtisuunnitelmat Rakennesuunnitelmat
Saarijärven Seudun Asumisoyhdistyksen Omatoimi-talo Sivulantie 7, Saarijärvi 2015	Stora Enso	Arkkitehtisuunnitelmat Rakennetyypit ja -detaljit
As. Oy Seinäjoen Mäihä Kniipinkuja 3, Seinäjoki 2016	Stora Enso	Arkkitehtisuunnitelmat Rakennesuunnitelmat
As. Oy Joensuun Pihapetäjä Honkapolku 4, Joensuu 2017	Pyhännän Rakennustuote	Arkkitehtisuunnitelmat Rakennetyypit ja -detaljit
VTS Koukkurannankatu 10 Koukkurannankatu 10, Tampere 2017	Elementti Sampo	Pääpiirustukset
As. Oy Jyväskylän Puukuokka 2 Syöttäjänkatu 1, Jyväskylä 2017	Pyhännän Rakennustuote	Arkkitehtisuunnitelmat Rakennesuunnitelmat

Haastattelujen ja kohdeaineiston lisäksi käytettiin kirjallisia lähteitä. Vaikka itse CLT-tilaelementtijärjestelmästä on julkaistu hyvin vähän kirjallisuutta, löytyy kuitenkin erik-

seen CLT-materiaalista, puukerrostalo- ja tilaelementtirakentamisesta kertovia lähteitä runsaasti. Luontevaksi etenemistavaksi osoittautui haastattelujen ja kirjallisuustutkimuksen tekeminen rinnakkain. Haastattelujen pohjalta nousseille teemoille etsittiin tukea kirjallisuudesta ja toisaalta haastatteluilla myös täydennettiin niitä tietoja, jotka eivät kirjallisuuden perusteella selvinneet. Työssä on pyritty erottelemaan, mitkä tiedot ovat peräisin haastattelulähteistä, mitkä kirjallisuuslähteistä ja mitkä johtopäätökset on tehty käytettävissä olleen kohdeaineiston perusteella.

Suunnitteluohjeiden muodostamisessa käytettiin haastatteluista, kohdeaineistosta ja kirjallisuudesta saatujen tietojen lisäksi laskennallisia tarkasteluja. Rakenteiden laskennalliset tarkastelut tehtiin Eurokoodien ja luvussa 3 esiteltyjen CLT:n mitoitusperiaatteiden mukaan. Suunnitteluohjeen mallipohjapiirroksat muodostettiin luovana suunnittelutyönä, jossa kokeilemalla etsittiin esimerkeiksi sopivia vaihtoehtoja.

1.5 Työn rakenne

Työn teoriaosuus keskittyy ensimmäiseen tutkimuskysymykseen kartoittamalla niitä suunnittelun keinoja, joilla voidaan edistää CLT-tilaelementtikerrostalon kilpailukykyistä toteutettavuutta. Jotta suunnitteluratkaisuja voidaan käsitellä, tarvitaan ensin perustiedot rakennejärjestelmästä. Nämä perustiedot kuvataan luvussa 2. Rakennejärjestelmän kuvaus etenee CLT-materiaalin esittelystä tilaelementin rakenteen kuvaukseen ja lopulta kokonaisen CLT-tilaelementtikerrostalon rakenteen kuvaukseen. Luvussa taustoitetaan myös tilaelementtirakentamisen periaatteet sekä siihen liittyvät edut ja haasteet.

Luku 3 keskittyy CLT-tilaelementtikerrostalon suunnitteluun rakenteiden näkökulmasta. Luvussa nostetaan valikoidusti esiin niitä erityispiirteitä, jotka tekevät rakennesuunnittelusta tavanomaisesta poikkeavaa tai ovat osoittautuneet haasteellisiksi. Nämä erityispiirteet johtuvat pääasiassa CLT:n materiaaliominaisuuksista, rakenteiden liitostekniikasta sekä teolliseen rakentamisprosessiin liittyvistä reunaehdoista, kuten tilaelementtien tuotannosta, nostoista, kuljetuksesta ja asennettavuudesta. Rakennesuunnittelun erityispiirteiden kartoittamisen tarkoituksena on löytää niitä rakenteisiin liittyviä haasteita, joita voitaisiin helpottaa tekemällä arkkitehtisuunnitelmat paremmin rakennejärjestelmälle sopiviksi.

Luvussa 4 nostetaan esiin tilaelementtikerrostalon arkkitehtisuunnitteluun liittyviä erityiskysymyksiä. Luvussa pohditaan erityisesti arkkitehtonisten ja tuotannollisten tavoitteiden välisiä ristiriitoja ja sitä, miten tilaelementtijaolla pystytään vaikuttamaan rakentamisen kustannustehokkuuteen. Luvussa käsitellään myös tilaelementtitekniikan asettamia reunaehdoja pohjapiirroksen suunnittelulle. Rajoitteita asettavat erityisesti tilaelementin mitat ja muoto sekä talotekniikan vaikutus tilojen sijoitteluun. Luonnossuunnittelun kannalta tärkeänä teemana käsitellään myös puun käyttöä rakennuksen julkisivuissa ja sisätiloissa.

Luku 5 sisältää diplomityön soveltavan osuuden, jossa kuvataan, millainen sisältö valittiin CLT-tilaelementtikerrostalon arkkitehtisuunnittelun ohjekorttiin. Ohjekorttiin valittiin ne osa-alueet, jotka osoittautuivat keskeisimmiksi vastauksiksi ensimmäiseen tutkimuskysymykseen. Kunkin osa-alueen käsittelyn yhteydessä pyritään vastaamaan toiseen tutkimuskysymykseen, eli miten tämä keskeiseksi osoittautunut suunnitteluinformaatio saadaan välitettyä arkkitehdille helposti sovellettavassa muodossa. Luvussa kuvataan, millä periaatteilla eri aihealueista muodostettiin käytännönläheisiä suunnitteluohjeita ja mikä esitystapa valikoitui parhaaksi tavaksi informaation välittämiseen. Suunnitteluohjeet muodostettiin teorialuvussa kartoitettujen tietojen ja tarvittaessa laskennallisten tarkastelujen pohjalta. Työn tuloksena syntynyt ohjekortti on esitetty työn liitteessä B.

2. CLT-TILAELEMENTTIKERROSTALON RAKENNEJÄRJESTELMÄ

Tilaelementtirakentaminen eli modulaarinen rakentaminen tarkoittaa rakentamisen tapaa, jossa rakennus kootaan esivalmistetuista tilakomponenteista. Tavanomaisessa elementtirakentamisessa rakennuskomponentit ovat tasomaisia seinä- ja laattaelementtejä, kun taas tilaelementtirakentamisessa esivalmistus on viety pidemmälle: seinä- ja laattaelementit on yhdistetty jo tehtaalla huonekokonaisuuksiksi tai kokonaisiksi asunnoiksi. Tämä mahdollistaa myös pintamateriaalien, talotekniikan ja kiintokalusteiden asentamisen valmiiksi elementtien sisälle.

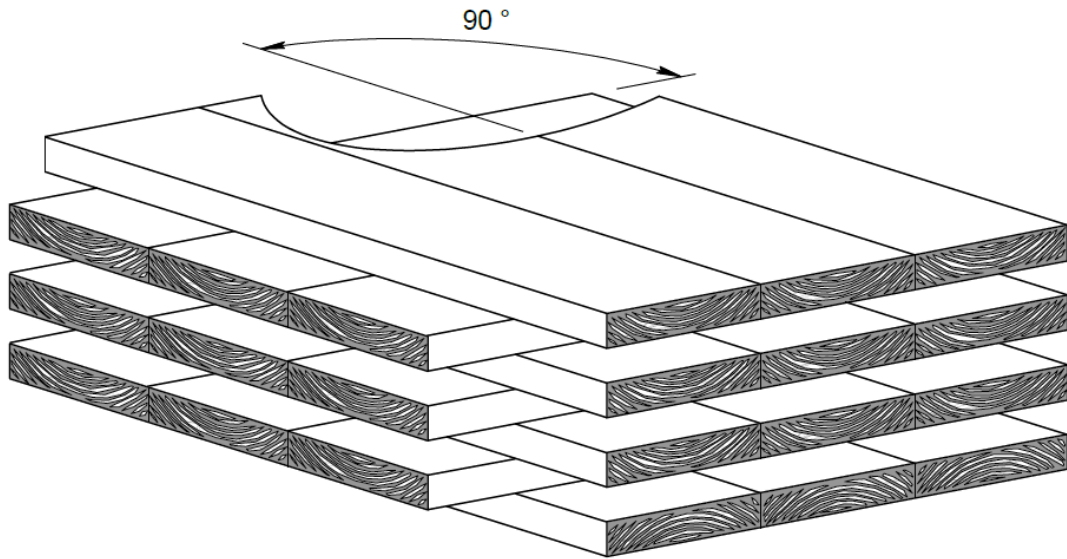


Kuva 2.1. Tilaelementti on rakennuskomponentti, jossa seinä- ja laattaelementit on yhdistetty jo tehtaalla valmiiksi toisiinsa. Pitkälle esivalmistetuissa tilaelementeissä ovat valmiina myös mm. julkisivuverhoukset. (Kuva: Elementti-Sampo)

Tilaelementtejä voidaan tehdä useista runkomateriaaleista, kuten puusta, teräksestä ja betonista. Tässä työssä käsitellään pelkästään CLT:stä valmistettuja puurakenteisia tilaelementtejä, mutta useimmat tilaelementtirakentamisen yleisperiaatteet pätevät kuitenkin materiaalista riippumatta. Tässä luvussa esitellään CLT-tilaelementtikerrostalon rakennejärjestelmä ja käsitellään lyhyesti tilaelementtirakentamisen etuja, haasteita ja rajoitteita.

2.1 CLT eli ristiinliimattu massiivipuulevy

CLT (engl. Cross-Laminated Timber) on levymäinen massiivipuutuote, joka on ensisijaisesti kehitetty toimimaan rakennusten kantavana rakenteena. CLT-levy koostuu vähintään kolmesta lujuusluokitellusta sahatavakerroksesta, jotka liimataan päällekkäin kohtisuorassa suunnassa toisiinsa nähden. Samansuuntaisia lautakerroksia voi olla 1-3 ennen syysuunnan vaihtumista. (ProHolz 2014)



Kuva 2.2. CLT-levyn rakenne. (EOTA 2015)

Suomessa käytettävät CLT-levyt valmistetaan kuusi- tai mäntylaudoista. Poikkileikkaus on aina symmetrinen ja uloin sahatavakerros on asetettu levyn pääasiallisen kantavan suunnan mukaisesti. (VTT Expert Services Oy 2015; ETA-14/0349; ETA-06/0138)

2.1.1 Levytyypit

Ristikkäisiä kerroksia eli lamelleja on vakiokokoisissa levyissä yleensä 3, 5, 7 tai 9. Taulukkoon 2.1 on koottu joidenkin eurooppalaisten CLT-valmistajien tuotetietoja. Näiden valmistajien levyjen vakiopaksuudet vaihtelevat välillä 57 – 340 mm. Yleensä sahatavaran suunta vaihtuu jokaisen lautakerroksen välillä, mutta joissakin paksummissa levytyypeissä on useampia yhdensuuntaista lautakerroksia päällekkäin keskimmissä tai uloimmissa lamelleissa. Tyypillinen valmistusleveys on noin 3 metriä. Taulukossa esitettyjen levyjen maksimipituus vaihtelee välillä 12 - 22 m. (VTT Expert Services Oy 2015; ETA-14/0349; ETA-06/0138; ETA-13/0684; BinderHolz Bausysteme GmbH; Cross Timber Systems 2014; MERK Timber 2015; CLT Finland Oy 2016)

Taulukko 2.1. Eurooppalaisten CLT-valmistajien tuotteiden mittoja.

Valmistaja	Valmistusmaa	Vakiopaksuuksia [mm]						Vakio- leveydet	Max. Pituus		
		3 lamellia		5 lamellia			7 lamellia				
Binderholz	Itävalta	60	80	100	120	140	260	280	2400	2600	22 000
		90	100	150	160	180	340		2750	2950	
		120		200	220	240			3200	3500	
				300	320						
Hoisko CLT	Suomi	60	70	100	120	140	180	200	2400	2700	12 000
		80	90	150	160	180	210	220	3000	3300	
		100	110	200	220		240	280	3500		
		120	140								
Crosslam	Suomi	60	80	100	130	160	140	180	2500	2600	12 000
		90	100	180	200		220	260	2700	2800	
		120	140				300		2900	3000	
		160						3100	3200		
Cross Timber Systems	Latvia	60	80	100	120	140	180	200	2400	2500	13 800
		90	100	160	180	200	240		2750	2950	
		120	160	220	240	260			3100		
				280	300	320					
MERK Timber	Saksa	70	80	120	130	140	180	190	max. 4800		20 000
		90	100	150	160	170	200	210			
							220	230			
							240				
KLH	Itävalta	57	60	95	117	125	201	226	2400	2500	16 500
		72	78	128	140	145			2720	2950	
		90	94	158	162	182					
		95	108	200	208	230					
		120		247	248	260					
				280	300	320					
Martinsons	Ruotsi	60	70	100	120	130	210	240	2400-3000		16 000
		80	90	140	150	160	270	280			
		100	120	180	200	230	300				
		140									
Stora Enso	Itävalta	60	80	100	120	140	180	200	2450	2750	16 000
		90	100	160	180	200	240		2950		
		120	160	220	240	260					
				280	300	320					

Nykymuotoista CLT:tä on tuotettu 1990-luvun puolivälistä lähtien, mutta sen sisällyttäminen standardeihin on edennyt hitaasti. Työtä tehdään kuitenkin sen eteen, että CLT-rakenteet saataisiin sisällytettyä Eurokoodeihin lähivuosina. Ennen sitä CLT-rakenteiden valmistusta ja suunnittelua säännellään pääasiassa ETA-hyväksynnöillä (European Technical Approval), jotka ovat tuotekohtaisia ja siten toisistaan eroavia. (Brandner ym. 2016) Suomalaisen CrossLamin tuotehyväksynnän on tehnyt VTT Expert Services Oy (2015).

2.1.2 Materiaaliominaisuudet

CLT:n materiaaliominaisuudet määrittyvät pääsääntöisesti sahatavaran lujuusluokan mukaan, joka on yleensä C24. CLT-tuotteiden hyväksynät ja sertifikaatit ovat valmistajakohtaisia, joten tuotteiden materiaaliominaisuudet ja suunnitteluperiaatteet poikkeavat toisistaan eri valmistajien välillä. Erot materiaaliominaisuuksissa johtuvat esim. erilaisista puulajeista, liimaustavasta, erilaisista kestävyysmäärittelytavoista ja siitä, onko lujuusarvot määritetty koko CLT-poikkileikkaukselle vai teholliselle poikkileikkaukselle. ETA-hyväksynnöissä lujuus- ja jäykkyysominaisuudet ilmoitetaan erikseen lappeellaan ja syrjälläan kuormitetuille CLT-levyille. Esimerkiksi Stora Enson CLT:n ominaisuudet poikkeavat sahatavaran materiaaliominaisuuksista jonkin verran kimmo- ja leikkausmoduulin, tasoa vastaan kohtisuoran taivutus- ja vetolujuuden sekä leikkausominaisuuksien osalta (ETA-14/0349).



Kuva 2.3. CLT-levyjä. (Kuva: Elementti-Sampo)

CLT-levyn uloimman kerroksen pinnan laatu valitaan sen mukaan, onko CLT tarkoitus jättää näkyväksi pinnaksi vai jääkö se piiloon muiden rakennekerrosten alle. Uloin kerros voidaan tehdä laadultaan valikoidusta sahatavarasta, joka asetellaan tiiviisti ilman rakoja. CLT:n pinta voidaan tehdä myös eri puulajista tai vaikka jalopuuvanerista. (MERK Timber 2015). Pinnaltaan näkyväksi tarkoitettu CLT on kalliimpaa kuin tavanomainen laatu.

2.2 Rakennejärjestelmän kuvaus

CLT-rakenne poikkeaa tavanomaisesta puurakenteesta siinä, että sama rakennustuote toimii samanaikaisesti useassa eri tehtävässä. CLT-levy toimii yhtä aikaa kantavana runkona, jäykistävänä levynä, höyryn- ja ilmansulkuna sekä osaltaan myös lämmöneristeenä. Toisinaan CLT toimii myös valmiina sisäpintana. Tavanomaisessa rankarakenteessa nämä toiminnot on eriytetty eri rakennustuotteille. (Moosbrugger ym. 2006)

CLT-tilaelementtijärjestelmän kehitystyö on vielä kesken, joten järjestelmään saattaa tulla tulevaisuudessa vielä paljonkin muutoksia uusien innovaatioiden ja tuotekehityksen myötä. Järjestelmän vakiintumattomuus näkyy myös kohdeaineistossa, jossa ratkaisut ovat muuntuneet ja jalostuneet kohteesta toiseen. Tyypillisen suomalaisen CLT-tilaelementtikerrostalon rakennejärjestelmän yleispiirteet on kuvattu tässä työssä taustamateriaalina käytetyn kohdeaineiston perusteella. Tyypilliset rakennetyypit on muodostettu RunkoPES-rakennetyyppikirjaston (Finnish Wood Research 2013) sekä uusimpien tilaelementtikohteiden rakennetyyppien pohjalta.

2.2.1 CLT-tilaelementin rakenne

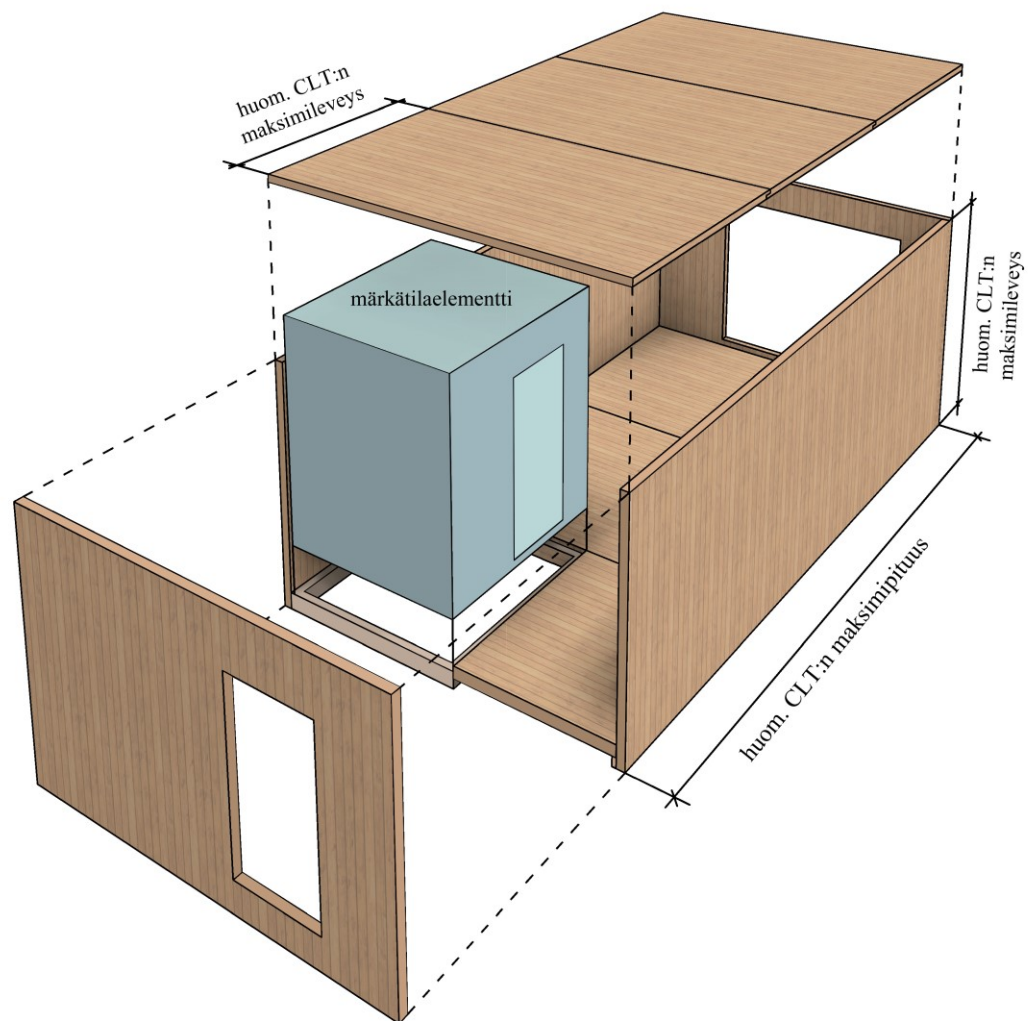
Tilaelementin perusmuoto on suorakulmainen särmiö, jossa kantavat seinät ovat pitkillä sivuilla. Kukin seinä pyritään tekemään yhdestä kokonaisesta CLT-levystä. Lattia ja katto voidaan tehdä yhdestä kokonaisesta CLT-levystä silloin, kun CLT:n valmistusmitat ovat siihen riittävät. Useimmiten lattia ja katto joudutaan kuitenkin koostamaan useasta rinnakkaisesta levystä. Tilaelementin rungon muodostumista CLT-levyistä on havainnollistettu kuvassa 2.4.

CLT-seinien paksuus on yleensä 100-120 mm. Aukot, reunamuodot ja tarvittavat loveukset työstetään levyihin valmiiksi jo CLT-tehtaalla, joten tilaelementtitehtaalle saavutuaan levyt eivät juurikaan vaadi enää työstämistä.

CLT-lattialevyn paksuuden tavanomainen vaihteluväli on jännevälistä riippuen 100-180 mm. Lattiaelementti kannatetaan CLT-seinien kylkiin kiinnitettyjen juoksujen päältä ja ruuvataan jokaiselta sivultaan. Tilaelementin lattian kantosuunta valitaan lyhyemmän sivun suuntaiseksi. Lattiarakenne voidaan myös toteuttaa palkkirakenteisena.

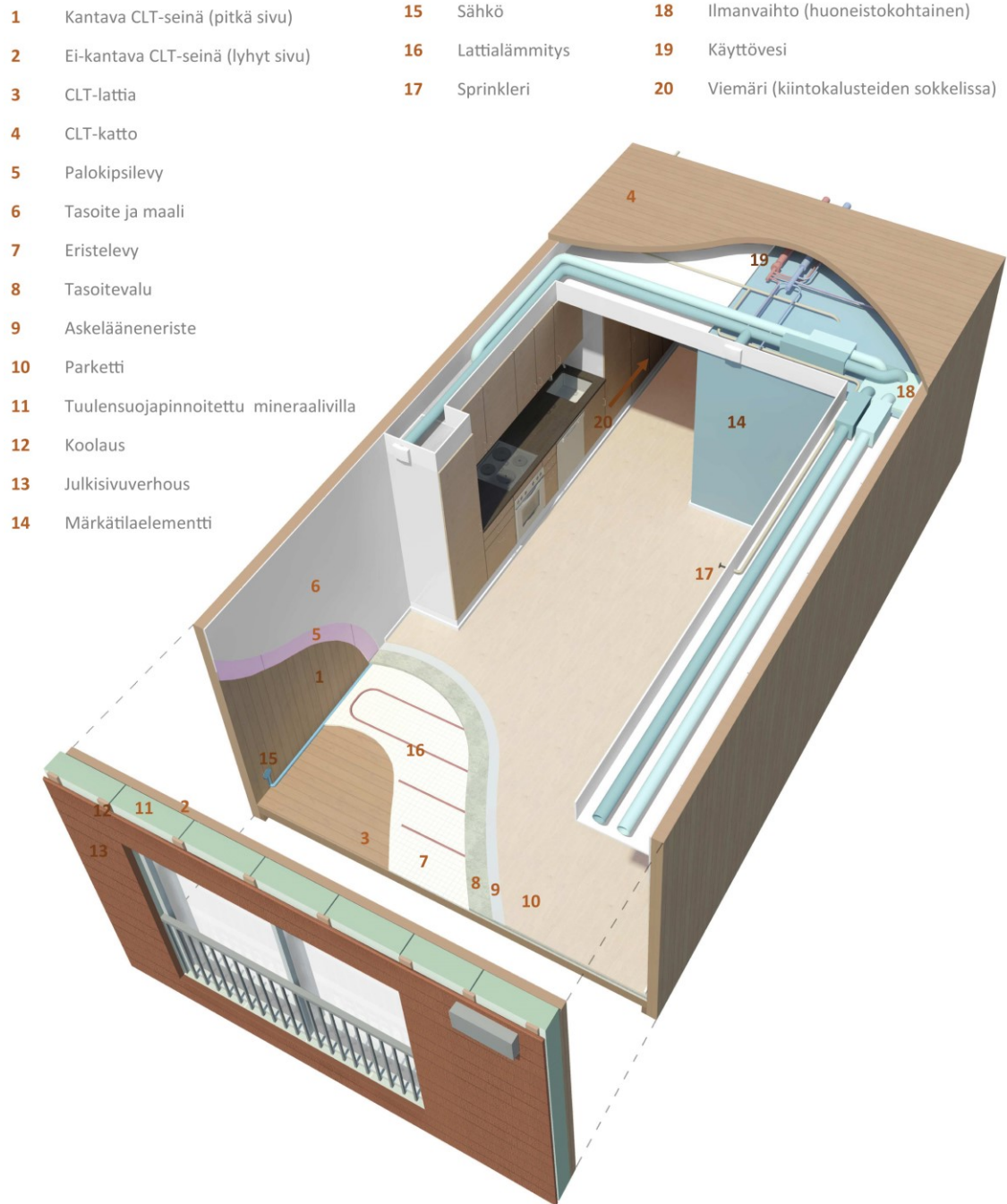
CLT-kattolevyn paksuus on yleensä 80-100 mm. Ylemmän tilaelementin lattia kantaa välipohjan hyötykuorman, joten tilaelementin katolle ei tule muuta pystykuormaa kuin sen oma paino ja rakennusaikainen hyötykuorma. Katto-CLT toimii kuitenkin osana rungon jäykistysjärjestelmää välittämällä vaakakuormat jäykistäville seinille.

Tilaelementin CLT-runko muodostaa asunnon ympärille tiiviin vaipan. CLT-rakenteen toimiminen rakenteen ilman- ja höyrünsulkuna varmistetaan levyjen välisten liitosten tiivistämisellä. Liitokset voidaan tiivistää tapauksesta riippuen esimerkiksi höyrünsulku-teipillä, saumanauhalla tai saumausmassalla.



Kuva 2.4. Tilaelementin rungon muodostuminen CLT-levyistä. Levyjen kantava suunta on sama kuin uloimman lautakerroksen suunta.

Asunnon märkätilat voidaan rakentaa alusta alkaen tehtaalla tai toteuttaa valmiilla märkätilaelementeillä. Märkätilaelementin voi valmistaa erillinen toimittaja ja se asennetaan tilaelementin sisään tilaelementin kasausvaiheessa. Kaikissa tässä työssä tarkastelluissa CLT-tilaelementtikohteissa on käytetty märkätilaelementtejä. Joitakin erillis-WC:itä on kuitenkin toteutettu myös tehtaalla rakentamalla.



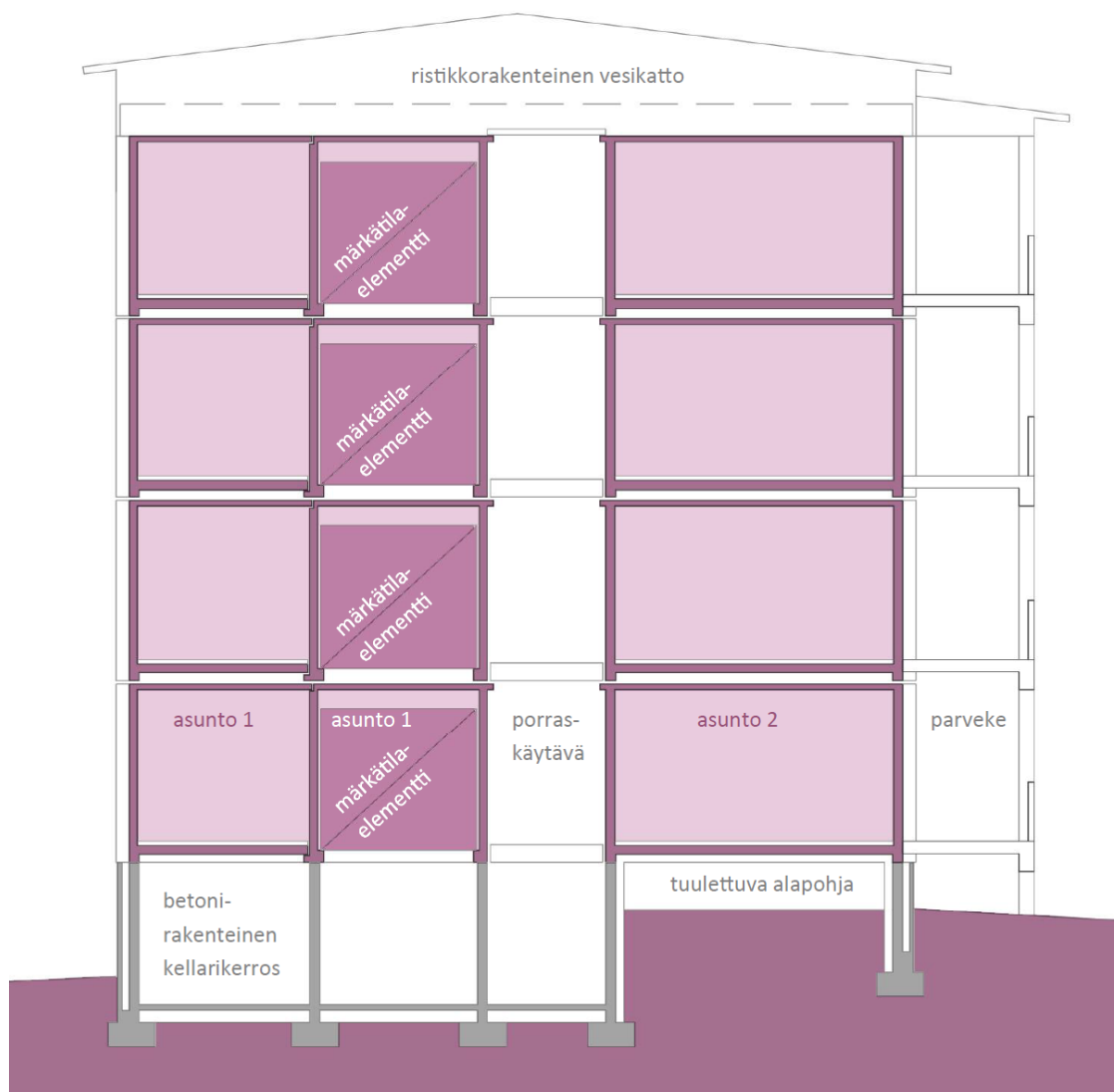
Kuva 2.5. Tilaelementin rakennetta kuvaava havainnekuva.

Tilaelementtitehtaalla seinä-, lattia- ja kattoelementit varustellaan mahdollisimman valmiiksi ennen kuin ne yhdistetään tilaelementeiksi. CLT-levyistä valmistetaan lattia-, katto- ja seinäelementtejä lisäämällä mm. eristeet, levytykset, koolaukset ja julkisivuverhoukset. Lisäksi valmistetaan kevyet väliseinäelementit, joissa ei yleensä käytetä CLT:tä. Valmiit seinä- ja laattaelementit yhdistetään tilaelementiksi ja mahdollinen märkätilaelementti viedään tilaelementin sisälle. Tilaelementin kokoamisen jälkeen tehdään talotekniikan asennukset ja alakatot, CLT-lattian päälle tulevat pintakerrokset ja lattiavalut, pintamateriaalien asennukset ja pintakäsittelyt sekä ovien ja listojen asennukset. Tilaelementteihin asennetaan myös kiintokalusteet mahdollisimman valmiiksi.

Tilaelementit voidaan jakaa kahteen eri tyyppiin: tekniikkamoduuleihin ja huonemoduuleihin. Suunnittelun peruseriaate on se, että märkätilat, talotekniset laitteet ja kytkennot keskitetään porrashuoneen vieressä sijaitsevaan tekniikkamoduuliin ja asunnon mahdollinen toinen tilaelementti, huonemoduuli, sisältää ainoastaan kuivia huonetiloja. Näin saadaan minimoitua talotekniikan vedot tilaelementtien ja porrashuoneen välillä.

2.2.2 CLT-tilaelementtikerrostalon rakenne

Tilaelementtikerrostalo muodostuu erillisistä, vierekkäin ja päällekkäin asetetuista tilayksiköistä. Tilaelementit kiinnitetään toisiinsa yleensä teräsosilla sekä pysty- että vaakasuunnassa. Toisiinsa kytketyt tilaelementit muodostavat rakennuksen kantavan ja jäykistävän rungon, eikä erillistä runkorakennetta siten tarvita. Jokaisella tilaelementillä on itsenäiset seinä-, lattia- ja kattorakenteet, minkä seurauksena huoneistojen väliset rakenteet ovat tuplarakenteita.



Kuva 2.6. CLT-tilaelementtikerrostalon rakenne.

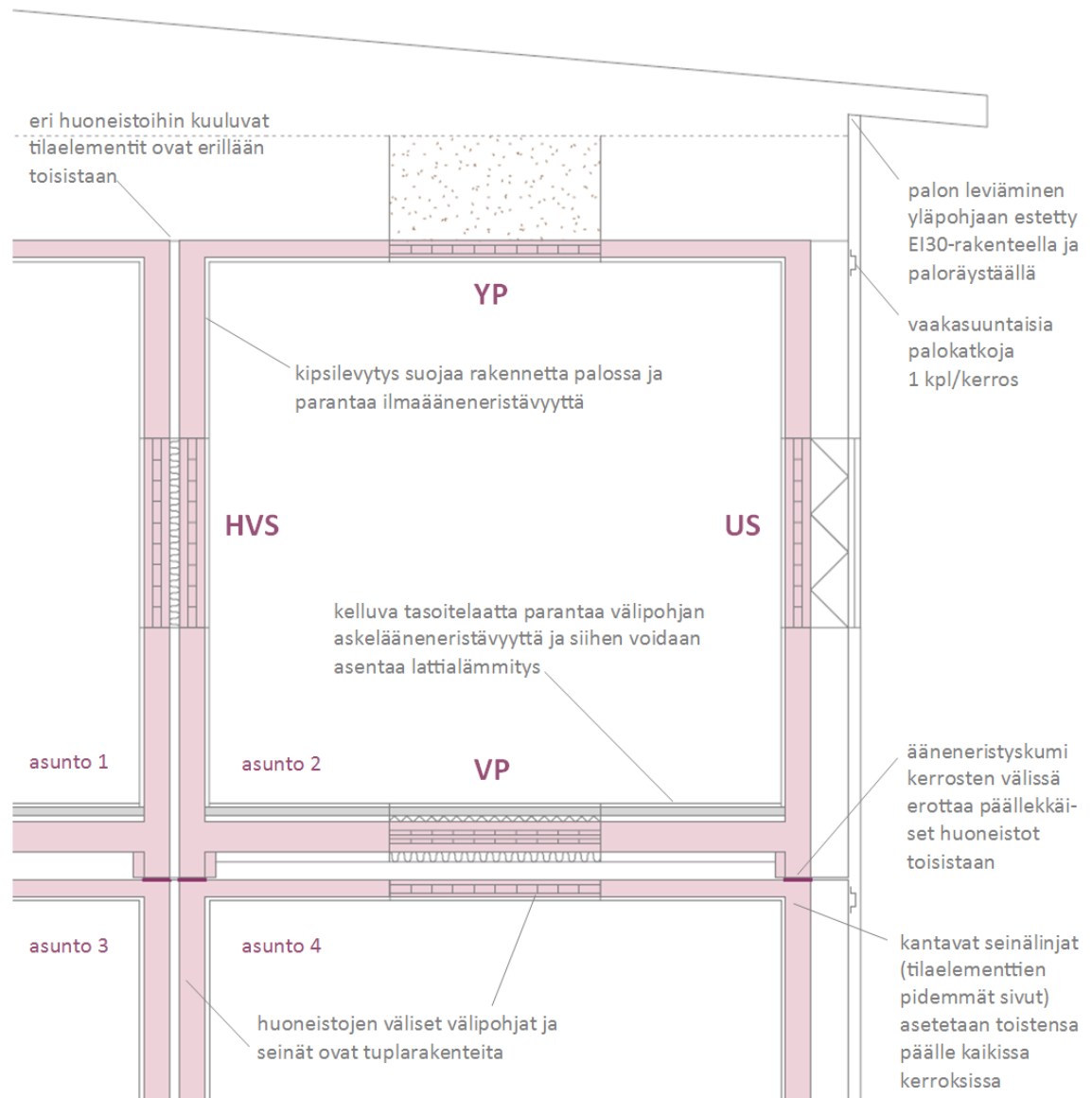
Tilaelementtihuoneisto koostuu tavallisesti yhdestä tai kahdesta tilaelementistä. 1-2 huoneen asunnot on tehokkainta muodostaa yhdestä tilaelementistä ja 3-4 huoneen asunnot kahdesta tilaelementistä. Akustisista syistä samaan tilaelementtiin ei sijoiteta kahden eri asunnon tiloja.

Tilaelementtikerrostalon alin kerros tehdään yleensä betonirakenteisena. Betonikerros voi olla joko maanpäällinen kerros tai kellarikerros. Betonikerrokseen voidaan sijoittaa asuntoja palvelevia yhteistiloja, teknisiä tiloja sekä tarvittaessa väestönsuojatilat. Mikäli tilaelementtien alapuolelle ei tehdä betonikerrosta, asennetaan ensimmäiset tilaelementit suoraan sokkelin päälle ja toteutetaan alapohja tuulettavana.

Tilaelementtikerrostalon parvekkeet voidaan toteuttaa monella eri tavalla. Korkeaan esivalmistusasteeseen päästään sisäänvedetyillä parvekkeilla, jotka voidaan tehdä tilaelementteihin valmiiksi jo tehtaalla. Ulokeparvekkeet voidaan toteuttaa joko erillisillä parveke-elementeillä tai julkisivupinnasta ulos työntyvillä tilaelementin päädyillä. Parvekkeet voidaan myös toteuttaa tavanomaiseen tapaan ulkopuolisella pilari- tai seinäkannatuksella.

Tilaelementtikerrostalon kerrospohja muodostuu useimmiten porrashuoneen ympärille jäsennellyistä tilaelementeistä. Porrashuone voidaan toteuttaa jättämällä tilaelementtien keskelle kuilu. Porrassyöksyt ja kerrostasoelementit kannatellaan kuilua ympäröivien tilaelementtien rakenteista, joten porrashuoneelle ei tarvitse rakentaa erillisiä kantavia rakenteita. Jos porrashuoneessa on ulkoilmaan rajautuvia seiniä, ne voidaan toteuttaa suurelementeillä.

CLT-tilaelementtikerrostalon kustannustehokkaan toteutettavuuden kannalta on osoittautunut hyväksi ratkaisuksi se, että kaikki talotekniikan pystynousut keskitetään porrashuoneeseen. Sijoittamalla LVIS-hormit porrashuoneeseen saavutetaan useita etuja: ääni- ja paloteknisesti haastavat välipohjalävistyksset saadaan vältettyä huoneistoissa, talotekniikan huoltaminen ja tarkastaminen on porrashuoneen puolelta helpompaa, vieräimelun haitat vähenevät ja talotekniset kytkennät pystytään tekemään omana työvaiheenaan rungon pystyttämisen jälkeen.

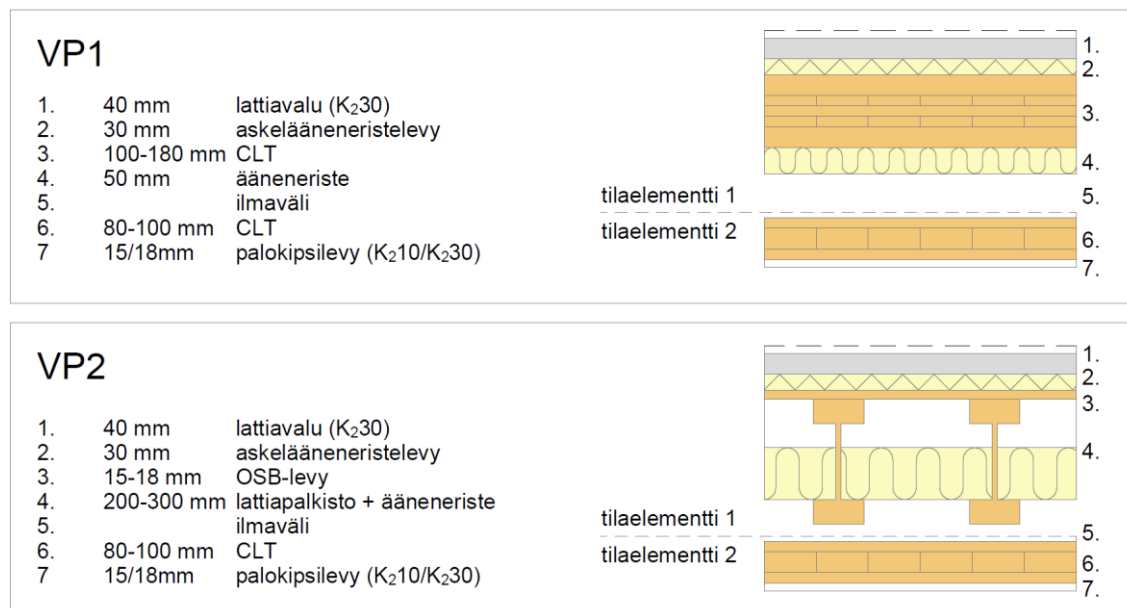


Kuva 2.7. CLT-tilaelementtikerrostalon ääni- ja paloteknisiä ratkaisuja.

Ääni- ja paloteknisillä ratkaisuilla on merkittävä vaikutus tilaelementtirakennuksen suunnitteluun. CLT-tilaelementtirakenteen akustiikan peruseriaatteita ovat tuplarakenteet sekä asuntojen eristäminen ympäröivistä rakenteista. Vaakasunnassa eri huoneistoihin kuuluvat tilaelementit ovat toisistaan erillään (välissä ilma-/eristeväli) ja pystysunnassa tilaelementit erotetaan toisistaan ääneneristyskumeilla. CLT-tilaelementtikerrostalon ääni- ja paloteknisiä yksityiskohtia on havainnollistettu kuvassa 2.7.

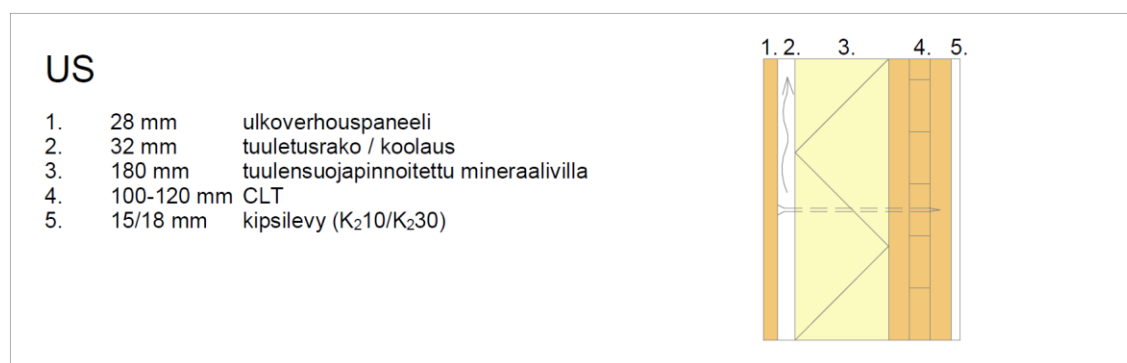
Tilaelementtikerrostalon välipohjarakenne koostuu alapuolisen tilaelementin katto-CLT:stä, eristetystä ilmapölystä sekä yläpuolisen tilaelementin lattia-CLT:stä. Tämä rakenne ei kuitenkaan vielä anna riittävää askelääneneristystä, joten lattia-CLT:n päälle valetaan vielä kelluva lattiavalu. Valu tehdään tilaelementtiin valmiiksi jo tehtaalla, joten kuivumisajat eivät pidennä työmaavaiheen pituutta. Lattiavaluun voidaan myös

asentaa lattialämmitys. CLT-lattian sijasta uusimmissa tilaelementtikohteissa on myös käytetty palkkirakenteista lattiaa.



Kuva 2.8. Välipohjan tavanomaisia rakennetyyppejä. Ylemmässä rakennetyypissä on näytetty CLT-rakenteinen lattia ja alemmassa palkkirakenteinen vaihtoehto.

Ulkoseinärakenne muodostuu CLT-levyn päälle asennetusta mineraalivillasta, jossa on tyypillisesti tuulensuojapinta valmiina. Koolaus voidaan kiinnittää CLT-levyyn mineraalivillan läpi. Julkisivurakenteet pyritään yleensä tekemään tilaelementteihin valmiiksi jo tehtaalla, jolloin työmaalla tehtäväksi jää elementtien välisten saumojen viimeistely.



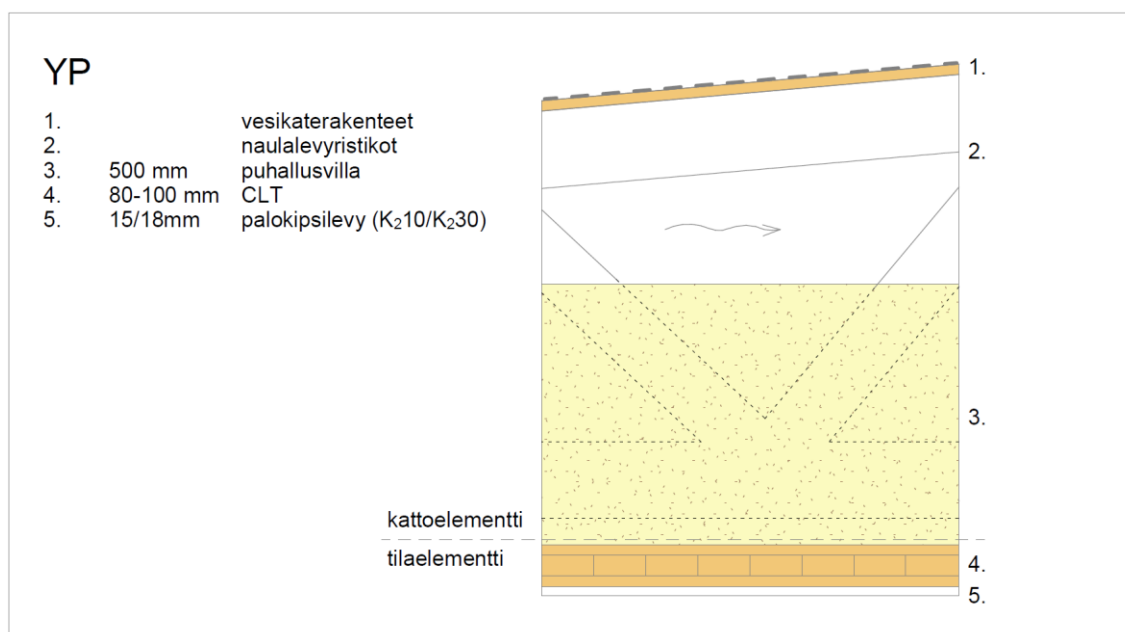
Kuva 2.9. Ulkoseinän tavanomainen rakennetyyppi.

Huoneistojen välinen seinä on tuplarakenne, joka muodostuu vierekkäisten tilaelementtien seinistä. Suojaverhousvaatimusten vuoksi CLT-seinät verhoillaan sisäpuolelta kipsilevyllä. Kipsilevyjä tarvitaan myös seinärakenteen ilmastänsäeristävyyden parantamiseen.



Kuva 2.10. Huoneistojen välisen seinän tavanomainen rakennetyyppi.

Tilaelementtikerrostalon vesikatto tehdään yleensä ristikkorakenteisena ulkopuolisella vedenpoistolla. Kattorakenne tuetaan tilaelementtien seinälinjoihin. Vesikaton asennusta voidaan nopeuttaa yhdistämällä rakenteet kattoelementeiksi, jolloin vesikatto voidaan nostaa tilaelementtien päälle valmiina lohkoina. Periaatteessa olisi myös mahdollista kiinnittää vesikattorakenteet valmiiksi ylimmän kerroksen tilaelementteihin, mutta silloin tilaelementin kokonaiskorkeus voi muodostua kuljetuksen kannalta ongelmalliseksi.



Kuva 2.11. Yläpohjan tavanomainen rakennetyyppi.

2.3 Tilaelementtirakentamisen periaate

Tilaelementtirakentaminen perustuu rakennuskomponenttien korkeaan esivalmistusasteeseen. Tilaelementtirakentamisen ideana on, että tilayksiköt tehdään mahdollisimman valmiiksi tehtaalla pintamateriaaleja, listoituksia, kiintokalusteita ja talotekniikkaa myö-

ten. Rakennuttajien haastattelujen mukaan olennaista on se, että mahdollisimman suuri osa työvaiheista saadaan tehtyä tehtaalla, sillä paikalla rakennettavat osuudet syövät nopeasti tehtaalla rakentamisesta saadun hyödyn (Ullakko 29.9.2016). Tavoitteena pitäisi olla se, että tilaelementti lähtisi tehtaalta sataprosenttisen valmiina, sillä jokainen työmaalla tehtävä työvaihe on kalliimpi kuin vastaavan työvaiheen tekeminen tehtaalla (Liimatainen 12.8.2016).



Kuva 2.12. Tilaelementtirakentamisessa työmaavaihe on nopea. Tilakomponentit esivalmistetaan mahdollisimman valmiiksi ja ne voidaan nostaa suoraan autosta lopullisille paikoilleen. (Kuva: Elementti-Sampo)

Tilaelementtitekniikalla on mahdollista toteuttaa hyvin monenlaisia asuinkerrostaloja. Suunnitteluratkaisut, joissa joudutaan jättämään paljon asioita työmaalla rakennettaviksi, eivät kuitenkaan tue pyrkimystä saada tilaelementtien esivalmistusaste mahdollisimman korkeaksi tehdastuotannon avulla. Suunnittelijan olisikin siis tärkeää olla tietoinen siitä, millaisilla suunnitteluratkaisuilla tilaelementtirakentamisesta pystytään saamaan etua rakennushankkeessa ja millaiset ratkaisut voivat puolestaan johtaa toteutustavan kannattamattomuuteen.

2.3.1 Tilaelementtirakentamisen edut

Työvaiheiden siirtäminen tehdasolosuhteisiin muuttaa rakentamisprosessia oleellisella tavalla verrattuna perinteiseen työmaapainotteiseen rakentamistapaan. Parhaimmillaan tilaelementtirakentamisella voidaan saavuttaa monia etuja. Seuraavaan listaan on koottu

haastatteluissa esiin nousseet CLT-tilaelementtirakentamisen keskeisimmät edut, joita tukevat myös kirjallisuudessa esitetyt havainnot ja tulokset:

- 1) **Ajansäästö rakentamisprosessissa.** Tilaelementtirakentamisen suurimpia etuja on nopea työmaavaihe (Sorri ym. 2013; Boyd ym. 2013; Liimatainen 12.8.2016; Rogan ym. 2000). Työn tuottavuus on huomattavasti tehokkaampaa tehdastuotannossa kuin vastaavien töiden suorittaminen paikalla (Eastman & Sacks 2008). Työmaalla ja tehtaalla tapahtuvia työvaiheita voidaan limittää, ja pitkälle valmiiksi tehtyjen komponenttien asentaminen on nopeaa. Kaluston tarve on työmaalla vähäisempi, mikä laskee esim. nosturin vuokrasta tulevia kustannuksia. (Lawson ym. 1999)
- 2) **Tuotannon laatu.** Korkeaa laatutasoa pidetään yleisesti tilaelementtien teollisen valmistustavan merkittävänä etuna (Blismas & Wakefield 2008; Boyd ym. 2013; Liimatainen 12.8.2016; Ullakko 29.9.2016). Monia perinteisesti työmaalla tehtäviä työvaiheita saadaan siirrettyä tehdasolosuhteisiin, mikä mahdollistaa paremman laadunvalvonnan ja vakioituneet työvaiheet. Laatuvirheitä ja siten myös reklamaatioita tulee vähemmän, mikä tuo tilaajalle säästöjä. (Liimatainen 12.8.2016; Rogan ym. 2000; Rannisto 2013; Lawson ym. 1999)
- 3) **Kosteusongelmien välttäminen.** Pääosa rakentamisesta tapahtuu kuivissa ja lämpimissä tehdasolosuhteissa, joissa kosteudenhallinta on huomattavasti helpompaa. (Sorri ym. 2013; Liimatainen 12.8.2016; Ullakko 29.9.2016; Arkkitehti 1 4.10.2016; Rannisto 2013)
- 4) **Ekologisuus.** Kontrolloidussa tehdastuotannossa materiaaleja pystytään käyttämään tehokkaammin ja työmaalla syntyvän rakennusjätteen määrä on huomattavasti pienempi (Blismas & Wakefield 2008; Lawson & Ogden 2010; Rogan ym. 2000). Liitokset suunnitellaan huolellisesti, jolloin niiden tiiviyyteen kiinnitetään enemmän huomiota myös toteutuksessa (Blismas & Wakefield 2008). Puumateriaalin käyttö rakentamisessa nähdään ekologisena vaihtoehtona (Liimatainen 12.8.2016; Arkkitehti 1 4.10.2016).

Haastatteluissa korostui myös kokemus CLT-tilaelementtikerrostalon hyvästä sisäilman laadusta (Ullakko 29.9.2016; Liimatainen 12.8.2016). Myös äänimaailmaa pidettiin pehmeämpänä kuin betonikerrostalossa (Liimatainen 12.8.2016; Arkkitehti 2 10.10.2016). Myös ympäristöministeriön rahoittamassa puukerrostalojen asukas- ja rakennuttajakyselyssä nousivat esiin viihtyisyys, lämmينhenkisyys, hyvä sisäilma ja hyvä ilmaääneneristävyys (Karjalainen 2017). Lisäksi kirjallisuudessa tuotiin esiin ympäristölle aiheutuvien häiriöiden vähäisyys. Rakentamisen aiheuttama liikennöinti työmaan ympäristössä on huomattavasti vähäisempää perinteisiin rakentamistapoihin verrattuna. Rakentamisesta aiheutuu myös vähemmän melua. Tilaelementit asennetaan paikoilleen

heti toimituksen jälkeen, jolloin materiaalien varastointitarve työmaalla vähenee. (Lawson & Ogden 2010) Tilaelementtirakentaminen voikin olla hyvä vaihtoehto täydennysrakentamiseen ahtaassa kaupunkiympäristössä (Rogan ym. 2000).

Edellä mainittujen etujen lisäksi kirjallisuudesta nousi esiin mm. rakentamistyön parempi tehokkuus ja turvallisuus. Kontrolloiduissa tehdasolosuhteissa turvallisuuden ja rakentamisprosessin hallinta on helpompaa. Tilaelementit rakennetaan lattiatasolla, jolloin korkeilla paikoilla ja eri kerroksissa työskentelyyn liittyvät riskit pienenevät. Työskentelyalueet pystytään rajaamaan siten, että kunkin alan urakoitsija pystyy toteuttamaan oman osuutensa häiriöttä. (Boyd ym. 2013)

2.3.2 Tilaelementtirakentamisen rajoitteet ja haasteet

Kuten edellisessä kohdassa todettiin, on tilaelementtitekniikassa potentiaalia moniin merkittäviin etuihin. Tilaelementtirakentamiseen liittyy kuitenkin myös paljon haasteita, jotka ovat hidastaneet rakentamistavan yleistymistä. Haastatteluissa ja kirjallisuudessa korostuivat seuraavat puukerrostalo- ja tilaelementtirakentamiseen liittyvät haasteet:

- 1) **Vakiintuneiden toimintatapojen puute.** Suurimpia puukerrostalo- ja tilaelementtirakentamisen haasteita on se, että tuotantomenetelmät ovat vuosikymmeniä jäljessä betonirakentamisesta (Liimatainen 12.8.2016). Vakiintuneita ratkaisuja ja ohjeistuksia ei vielä ole (Liimatainen 12.8.2016; Ullakko 29.9.2016; Blismas & Wakefield 2008). Myös toimijoiden vähyys vaikeuttaa uusien ratkaisujen tuleamista markkinoille (Sorri ym. 2013).
- 2) **Osaamisen puute.** Suunnittelijoilla ja rakennuttajilla ei useinkaan ole riittävää osaamista tilaelementtirakentamiseen ja sen erityispiirteisiin, sillä tekniikka on uusi ja aiheeseen liittyvää koulutusta ja kokemusta vähän (Liimatainen 12.8.2016; Ullakko 29.9.2016; Blismas & Wakefield 2008; Boyd ym. 2013; Rannisto 2013).
- 3) **Tilaelementtien kuljetus ja nosto.** Tontin liikenteellinen sijainti, kuljetuksen rajoitteet, etäisyys ja kalleus voivat tulla esteeksi tilaelementtien käytölle. (Liimatainen 12.8.2016; Blismas & Wakefield 2008; Boyd ym. 2013)
- 4) **Viranomais määräysten rajoitteet.** Tiukat palomääräykset rajoittavat puurakenteisten tilaelementtikerrostalojen kilpailukykyä. Tilaelementtirakentamisen kilpailukykyä rajoittaa myös se, että tilaelementtien välisten seinien suuri rakennepaksuus syö käytettävissä olevaa rakennusoikeutta. (Sorri ym. 2013; Liimatainen 12.8.2016) Ratkaisut täytyy erikseen perustella ja neuvotella joka kunnassa, koska niille ei ole vielä yleisiä hyväksyntöjä (Ullakko 29.9.2016).

- 5) **Asenteet.** Asenneongelmia on niin rakennuttajissa, suunnittelijoissa kuin asukkaissakin. Puukerrostalon paloturvallisuutta ja ääniteknistä toimintaa kyseenalaistetaan. (Ullakko 29.9.2016) Totutuista rakentamistavoista poikkeaminen aiheuttaa muutosvastarintaa (Blismas & Wakefield 2008). Betonirakentamisen vahvat perinteet vaikuttavat asenteisiin ja kivitalo koetaan paremmin arvonsa säilyttävänä (Ijäs 2013). Järjestelmän käyttöä voivat hidastaa myös mielikuvat ja aikaisemmat negatiiviset kokemukset tilaelementtiratkaisujen joustamattomuudesta ja heikkotasoisesta ulkoarkkitehtuurista (Blismas & Wakefield 2008; Boyd ym. 2013; Rannisto 2013).

- 6) **Taloudellisuus ja kilpailuttamisen vaikeus.** Rakennuttajatahot kokevat puukerrostalon taloudellisena riskinä (Ijäs 2013). Jotta tilaelementtirakentaminen olisi kannattavaa, täytyy suunnittelu tehdä alusta alkaen toteutustavalle sopivalla tavalla, jossa on huomioitu rakennustekniikan erityispiirteet ja reunaehdot. Tilaelementtiratkaisulla on vaikea osallistua urakkakilpailuihin, joissa suunnitelmia ei ole laadittu alun perin tilaelementtitekniikalla toteutettaviksi. (Ullakko 29.9.2016; Rannisto 2013) Toimijoita on vähän ja tuotteiden mittaerot voivat rajata toimittajia pois. (Ullakko 29.9.2016; Arkkitehti 1 4.10.2016)

Haastatteluissa painoarvoa saivat erityisesti vakiintuneiden ratkaisujen ja osaamisen puute ja siitä seuraavat suunnitteluun liittyvät ongelmat (Liimatainen 12.8.2016; Ullakko 29.9.2016). Ongelmana nähtiin erityisesti se, että suunnittelijat ja rakennuttajaorganisaatiot koulutetaan ennen kaikkea betonirakenteisten asuintalojen suunnitteluun ja tuotantoon. Kaikki betonirakentamisen periaatteet eivät toimi puu- ja tilaelementtirakentamisessa, sillä lähtökohdat ja rajoitteet ovat erilaisia. Erityisesti tämä näkyy arkkitehtisuunnitelmissa, joissa ei ole osattu huomioida tilaelementtirakenteiden, talotekniikan ja teollisen rakentamistavan erityispiirteitä. (Liimatainen 12.8.2016)

Jotta tilaelementtirakennuksen suunnittelu onnistuisi, tulisi suunnittelijoilla olla tiedossa teollisen tuotantotavan ja asennettavuuden vaatimukset. Tilaelementtirakentaminen vaatii suunnitelmilta korkeaa valmiusastetta aikaisemmassa vaiheessa kuin tavanomaisessa rakentamisessa. Yhteistyötä eri suunnittelijoiden ja tuotannon välillä tarvitaan tavanomaista enemmän, eikä prosessia vielä hallita kunnolla. Tilaelementtien valmistus tehtaassa ja perustustyöt työmaalla voivat tapahtua samanaikaisesti, joten suunnitelmien on oltava täysin valmiit silloin kun rakentaminen aloitetaan. Muutosten tekeminen tuotantovaiheessa on vaikeaa ja johtaa ylimääräisiin kustannuksiin. Suunnittelun ohjauksella on merkittävä rooli, sillä suunnitteluratkaisut pitää kyetä valitsemaan ja lukitsemaan ennen tuotannon aloitusta. Myös suunnitelmilta vaadittava tarkkuustaso on korkeampi, sillä toleranssit voivat olla pienempiä. (Sorri ym. 2013) Pienten toleranssien vuoksi tilaelementtien yhteensovittaminen liitoskohdissa aiheuttaa haasteita (Boyd ym. 2012; Takala 30.11.2016).

Haastatteluissa suunnitteluun liittyvien ongelmien yhtenä ratkaisuna nähtiin suunnittelua ohjeistavan materiaalin tuottaminen ja julkaiseminen (Arkkitehti 1 4.10.2016; Arkkitehti 2 10.10.2016). Tämä diplomityö pyrkii vastaamaan suunnittelutiedon tarpeeseen erityisesti arkkitehtisuunnittelun osalta. Toisaalta arkkitehtien haastatteluissa nousi esiin kokemuksen merkitys - parhaiten tilaelementtitekniikan lainalaisuudet oppii hallitsemaan vain kokemuksella aiemmista vastaavista projekteista. Tärkeänä nähtiin myös suunnitteluprosessin parantaminen eri alojen yhteistyötä lisäämällä. Arkkitehdin tulisi pyytää tilaelementtirakentamisen hallitsevat rakenne- ja LVIA-suunnittelijat mukaan suunnitteluun heti alussa (Liimatainen 12.8.2016; Arkkitehti 3 19.12.2016). Suunnitteluprosessin parantamiseen liittyy myös olennaisesti riittävän suunnitteluajan varaaminen sekä arkkitehtisuunnitteluun että rakenne- ja talotekniikkasuunnitteluun. Myös tietomallintamista tulisi hyödyntää tehokkaasti. (Takala 30.11.2016)

3. RAKENNESUUNNITTELUN ERITYISKYSYMYKSIÄ

Tässä luvussa käsitellään erityiskysymyksiä, joita CLT:n materiaaliominaisuudet ja tilaelementtitekniikka aiheuttavat CLT-tilaelementtikerrostalon rakenteiden suunnittelulle. Luvussa kartoitetaan niitä asioita, jotka CLT-tilaelementtikerrostalon suunnittelussa poikkeavat tavanomaisesta asuinkerrostalosta. Tämä luku toimii taustoituksena rakennussuunnitteluohjeiden muodostamiselle, joka kuvataan luvussa 5.

Rakennesuunnittelun erityiskysymyksissä keskitytään erityisesti siihen, millaisilla suunnitteluratkaisuilla tilaelementtikerrostalon CLT-rungolle saadaan toimiva yleismuoto. Rakennusfysiikkaan, liitostekniikkaan ja detaljeihin liittyvien erityiskysymysten syvällisempi käsittely on rajattu tämän työn ulkopuolelle. Toimivassa CLT-rungossa tilaelementit ovat sopivan kokoisia niin noston, kuljetuksen kuin tehdastuotannonkin kannalta. Rakenteiden dimensiot ja aukotus ovat sellaiset, että rakenteet kestävät sekä asennuksen aikaiset, käytön aikaiset että palotilanteen kuormat. Pohjapiirros on muodostettu siten, että jäykistäviä rakenteita on riittävästi ja ne on sijoitettu tarkoituksenmukaisesti.

CLT:n ristiinliimattu rakenne tuo mitoitukseen erityispiirteitä, joita havainnollistetaan esittelemällä lappeellaan ja syrjällään kuormitetun CLT:n mitoitus taivutukselle, leikkaukselle ja normaalivoimalle. Puun materiaaliominaisuuksiin liittyy olennaisesti myös puukerrostalon paloturvallisuus, jota käsitellään seuraavassa kohdassa. Samassa yhteydessä esitellään myös rakenteiden palomitoituksen periaatteet.

Rakennusrungon jäykistykseen liittyy paljon erityiskysymyksiä tilaelementtikerrostalon suunnittelussa. Rakennusrungon riittävän jäykkyyden saavuttamiseen tuovat haasteita erityisesti liitosten akustiset ominaisuudet sekä puumateriaalin keveys. Mitä korkeampiin rakennuksiin mennään, sitä merkittävämmiksi käyttörajatilan ilmiöt tulevat jäykistysjärjestelmän suunnittelussa. Rakennusrungon käyttäytymistä käyttörajatilassa on vaikea arvioida, koska yksiselitteisiä raja-arvoja ei ole annettu esimerkiksi vaakasiirtymän ja värähtelyn hyväksyttävyydelle. Näitä erityiskysymyksiä käsitellään omassa alaluvussaan jäykistysperiaatteiden jälkeen.

Viimeisessä alaluvussa tuodaan esiin joitakin tilaelementtikerrostalon rakentamisprosessiin liittyviä asioita, jotka vaikuttavat suunnitteluratkaisuihin. Tilaelementin sopivan koon määrittämiseen vaikuttavat niin noston, tehdastuotannon kuin kuljetuksenkin asetamat vaatimukset. Samassa luvussa käsitellään myös asennusjärjestyksen vaikutusta liitososien sijoitteluun ja jäykistävien seinien valintaan.

3.1 CLT:n mitoitus lappeellaan

CLT:n kerroksellinen rakenne tuo omat erityispiirteensä rakenteiden mitoitukseen. Peruseriaate on se, että kuorman siirtymissuunnassa olevat lamellit kantavat pääasiassa rakenteelle tulevat kuormat. Yleensä kantava suunta on sama kuin CLT:n uloimpien lamellien syysuunta. Rakenteiden mitoituksen tekee kuitenkin monimutkaisemmaksi se, miten kuorman siirtymissuuntaan nähden kohtisuora kerros vaikuttaa poikkileikkaussuureisiin ja jännitysten jakautumiseen. Poikittaisen kerroksen huomioiminen on olennaista erityisesti lappeellaan kuormitetun CLT:n mitoituksessa.

Lappeellaan kuormitetut CLT-rakenteet ovat yleensä laattarakenteita. Tilaelementissä laattarakenne on sekä lattiassa että katossa. Tässä luvussa esitellään CLT-laatan taivutus- ja leikkausmitoitus murtorajatilassa. CLT-lattialaatan paksuus määräytyy kuitenkin käytännössä aina käyttörajatilan perusteella, joten tähän lukuun on sisällytetty myös CLT-lattian mitoitus kävelystä aiheutuvalle värähtelylle. Myös CLT-laatan tukipainekestävyys on nostettu esiin omana aiheenaan, sillä se voi osoittautua CLT-tilaelementtikerrostalon suunnittelussa merkitseväksi.

3.1.1 CLT:n taivutusmitoitus lappeellaan

Poikittaisten lamellien pienen leikkausjäykkyyden vuoksi leikkausmuodonmuutoksen vaikutus tulee ottaa huomioon CLT-laatan mitoituksessa (Brandner ym. 2016). Poikittainen kerros voidaan huomioida CLT-laatan taivutus- ja leikkausmitoituksessa joustavasti kootun kerrospalkin teorialla (ETA-08/0271). Teoria on esitelty Eurokoodin EN 1995-1-1 (2014) liitteessä B mekaanisin liittimin kootuille palkeille. Kun teoriaa sovelletaan CLT:lle, jossa lamellit on yhdistetty toisiinsa liimaamalla, käytetään liitinvälin ja liittimen siirtymäkertoimen suhteelle s_i/K_i korvaavaa kerrointa. Tämä korvaava kerroin on $d_{ij} / (G_R \cdot b)$ eli kuorman siirtymissuuntaan nähden kohtisuoran kerroksen d_{ij} paksuuden suhde tasoleikkausmoduulin G_R ja levyn leveyden b tuloon.

Taivutusjännitys määritetään teholliselle poikkileikkaukselle, jonka tehollinen jäyhyysmomentti lasketaan viisikerroksiselle levyille kaavalla (Kevälinmäki 2014; VTT Expert Services Oy 2014)

$$I_{ef} = \sum_1^3 (I_i + \gamma_i \cdot A_i \cdot a_i^2)$$

missä

$$A_i = b \cdot h_i$$

$$I_i = \frac{b \cdot h_i^3}{12}$$

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_{0,mean} \cdot A_1 \cdot d_{12}}{G_{R,mean} \cdot b \cdot l^2}}$$

$$\gamma_2 = 1$$

$$\gamma_3 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_{0,mean} \cdot A_3 \cdot d_{23}}{G_{R,mean} \cdot b \cdot l^2}}$$

$$a_1 = \left(\frac{h_1}{2} + d_{12} + \frac{h_2}{2} \right) - a_2$$

$$a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot A_1 \cdot \left(\frac{h_1}{2} + d_{12} + \frac{h_2}{2} \right) - \gamma_3 \cdot A_3 \cdot \left(\frac{h_2}{2} + d_{23} + \frac{h_3}{2} \right)}{\sum_1^3 (\gamma_i \cdot A_i)}$$

$$a_3 = \left(\frac{h_2}{2} + d_{23} + \frac{h_3}{2} \right) + a_2$$

missä

h_i = kuormitusta ottavan pituussuuntaisen kerroksen i paksuus

d_{ij} = pituussuuntaisten kerrosten i ja j välissä olevan poikittaisen kerroksen paksuus

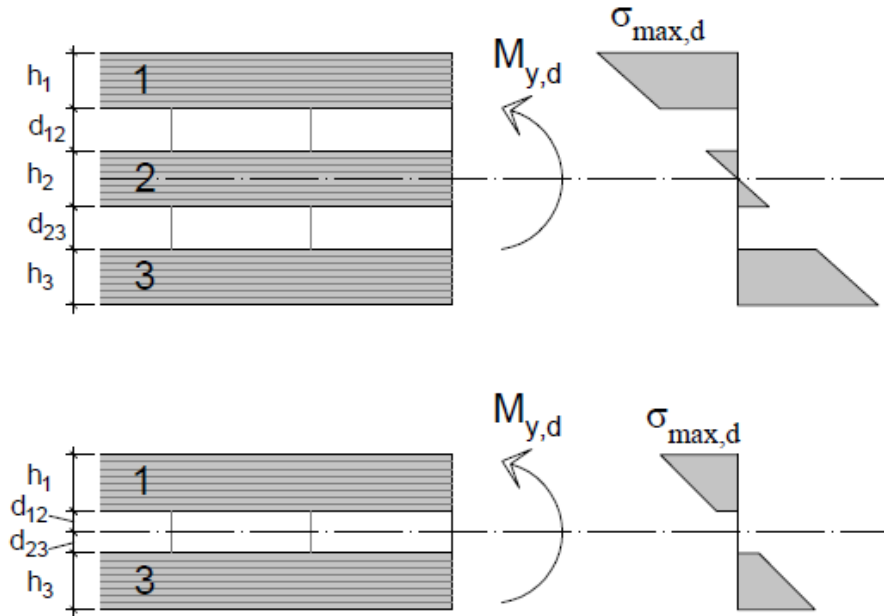
b = laatan leveys

l = jänneväli

$G_{R,mean}$ = tasoleikkausmoduulin keskiarvo

$E_{0,mean}$ = kimmomoduulin ominaisarvo syysuuntaan.

Kolmekerroksiselle levyllä tehollinen jäyhyysmomentti lasketaan vastaavasti määrittämällä $h_2 = 0$, $d_{12} = d/2$ ja $d_{23} = d/2$, missä d on poikittaisen keskilamellin paksuus (Kevärinmäki 2014; VTT Expert Services Oy 2014). Viisi- ja kolmekerroksisen CLT:n lape-
taivutuksessa käytettävää poikkileikkausta on havainnollistettu kuvassa 3.1.



Kuva 3.1. Viisi- ja kolmekerroksisen CLT:n lapetaivutus.

Suurimmat taivutusjännitykset esiintyvät pituussuuntaisten lautojen reunoilla, joten lautojen keskellä oleva taivutusjännitys voidaan jättää huomiotta (ETA-08/0271). Kun tehollinen jäyhyysmomentti on saatu selville, voidaan taivutusmitoitus tehdä kaavalla (Kevarinmäki 2014; VTT Expert Services Oy 2014)

$$\sigma_{m,r,i,d} = \frac{M_d}{I_{ef}} \cdot \left(\gamma_i \cdot a_i + \frac{h_i}{2} \right),$$

joka antaa taivutusjännityksen pituussuuntaisten lautojen reunoilla. Jännitystä verrataan lappeellaan kuormitetun CLT:n taivutuslujuuteen. Kun CLT-levyä taivutetaan lappeellaan, sen taivutuslujuutta voidaan korottaa rinnakkaisten pituussuuntaisten lautojen lukumäärästä riippuvalla kuormanjakoluvulla k_{sys} . Kerroin on esitelty Eurokoodissa EN 1995-1-1 kohdassa 6.6. CLT:llä käytetään kuormanjakoluvulle maksimiarvoa 1,1 tai 1,2 tuotehyväksynnästä riippuen. Maksimiarvon ollessa 1,1 korotuskerroin lasketaan kaavalla (Kevarinmäki 2014)

$$k_{sys} = \min \begin{cases} 1 + 0,025 \cdot n \\ 1,1 \end{cases}$$

tai maksimiarvon ollessa 1,2 kaavalla (VTT Expert Services Oy 2014)

$$k_{sys} = \min \begin{cases} 1 + 0,025 \cdot n \\ 1,2 \end{cases}$$

missä

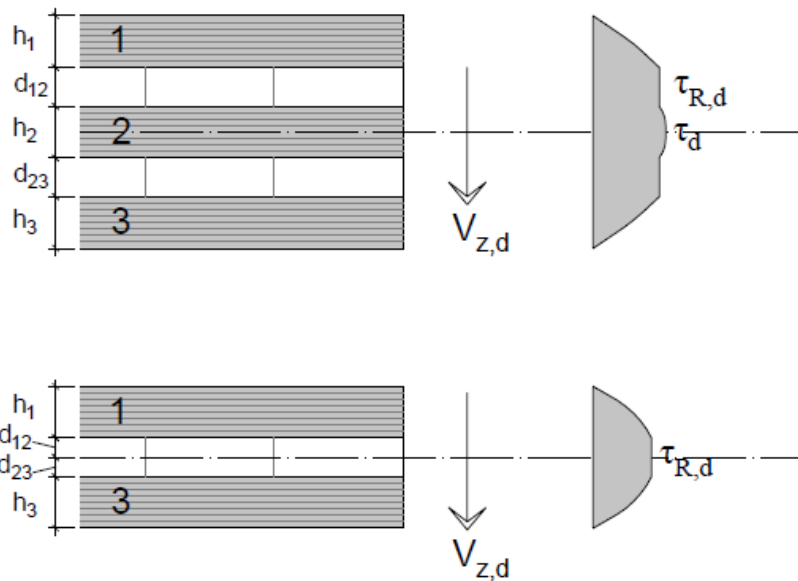
n = vierekkäisten lautojen lukumäärä tarkasteltavassa kerroksessa.

Tuotehyväksynnästä riippuen korotuskertoimen maksimiarvo saavutetaan siis silloin, kun lamellissa on vähintään 4 tai 8 vierekkäistä lautaa.

3.1.2 CLT:n leikkausmitoitus lappeellaan

Lappeellaan kuormitetun CLT:n leikkauskestävyys tarkistetaan sekä pituussuuntaisille että poikittaisille lamelleille. Pituussuuntaisten lamellien leikkauskestävyys mitoitetaan normaalin sahatavarapalkin tapaan syysuuntaisen leikkauskestävyyden mukaan. Tämä tulee leikkausmitoituksen määrääväksi tapaukseksi silloin, jos pituussuuntaisia lamelleja on vain yksi. (Kevarinmäki 2014; VTT Expert Services Oy 2014) Poikittaisten lamellien osalta tarkistetaan puolestaan tasoleikkaus. CLT-laatan leikkaukskapasiteetti määräytyy yleensä kuorman siirtymissuuntaan nähden poikittaisen lautakerroksen tasoleikkauslujuuden $f_{R,k}$ (rolling shear) mukaan (ProHolz 2014).

Poikittaisen kerroksen jäykkyys on niin pieni verrattuna pituussuuntaisen lamellien jäykkyyteen, että yksinkertaisuuden vuoksi voidaan poikittaiselle kerrokselle olettaa $E_{90} = 0$. Tällöin leikkausjännitys on poikittaisessa kerroksessa vakio (katso kuva 3.2). (Brandner ym. 2016)



Kuva 3.2. Viisi- ja kolmekerroksisen CLT:n leikkaus lappeellaan, kun oletetaan poikittaisille lamelleille $E_{90} = 0$. Poikittaisista kerroksista tarkistetaan tasoleikkausjännitys $\tau_{R,d}$.

Leikkausjännitys poikkileikkauksen korkeudella z voidaan laskea kaavalla (Kevarinmäki 2014; VTT Expert Services Oy 2014)

$$\tau = \frac{V_d \cdot \gamma_i \cdot S_i}{I_{ef} \cdot b} \leq f_{R,d}$$

missä

V_d = leikkausrasitus

S_i = poikkileikkauksen kohdan z ja CLT:n ulkoreunan väliin jäävien pitkittäisten lamellien staattinen momentti neutraaliakselin suhteen

I_{ef} = koko poikkileikkauksen tehollinen jäyhyysmomentti

b = laatan leveys.

Leikkausjännitys on suurimmillaan poikkileikkauksen neutraaliakselilla. Tasoleikkausjännityksen kannalta kriittisin on siis se poikittainen lautakerros, joka on lähimpänä poikkileikkauksen neutraaliakselia.

3.1.3 Kävelyn aiheuttama välipohjien värähtely

Ihminen on herkkä aistimaan värähtelyn aiheuttamaa haitallista ääntä tai liikettä. Välipohjan notkuminen askelten alla voi tuntua häiritsevältä ja askelten isku lattiaan voi aiheuttaa liian suurta tärinää tai resonanssia. Välipohjan värähtely voi myös aiheuttaa haitallista ääntä hyllyissä olevien tavaroiden helistessä tai huonekasvien värähtely voi olla häiritsevää. (Teräsrakenneyhdistys 2005)

Raskailla välipohjilla on tyypillisesti matala ominaistajuus ja kevyillä välipohjilla korkea ominaistajuus (Teräsrakenneyhdistys 2005). CLT-lattian ominaistajuus jää herkästi alhaiseksi ja kävelystä aiheutuva värähtely tulee aina tilaelementtikerrostalon lattioilla määrääväksi mitoitusapaukseksi. Matalataajuuksisen ja korkeataajuuksisen lattian raja-arvo vaihtelee lähteestä riippuen. Suomessa puuvälipohjien värähtelymitoituksessa käytetään kansallisessa liitteessä esitettyä korvaavaa menetelmää, joka on erilainen kuin Eurokoodin esittelemä menetelmä. Kansallisen liitteen mukaan matalataajuuksiset puuvälipohjat vaativat erityistarkastelua, mikäli alin ominaistajuus on alle 9 Hz. (Ympäristöministeriö 2007a) Suunnittelussa tulisi pyrkiä siihen, että CLT-lattia olisi korkeataajuuksinen, eli alin ominaistajuus olisi suurempi tai yhtä suuri kuin 9 Hz.

Ominaistajuuden laskennassa lattiarakenteen massaksi otetaan rakenteen oman painon ominaisarvo sekä hyötykuormaa 30 kg/m^2 (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 2012):

$$m = \frac{G_k}{g} + 30 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Värähtelymitoituksen kaavat on annettu erikseen sekä kahdelta sivulta tuetulle että neljältä sivulta tuetulle lattialle. Suorakaiteen muotoisen, kahdelta sivulta tuetun lattian alin ominaistajuus lasketaan kaavalla (Ympäristöministeriö 2007a)

$$f_1 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}}$$

ja neljältä sivulta tuetun lattian alin ominaistaajuus lasketaan kaavalla (Ympäristöministeriö 2007a)

$$f_1 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}} \cdot \sqrt{1 + \left[2 \cdot \left(\frac{l}{b}\right)^2 + \left(\frac{l}{b}\right)^4 \right] \cdot \frac{(EI)_b}{(EI)_l}}$$

missä

l = lattiarakenteen jänneväli [m]

b = lattiarakenteen leveys [m]

$(EI)_l$ = lattian kantavaa suuntaa l vastaava taivutusjäykkyys leveysyksikköä kohti [Nm^2/m]

$(EI)_b$ = lattian poikittais-suuntaa b vastaava taivutusjäykkyys leveysyksikköä kohti [Nm^2/m]

m = lattian oman painon ja hyötykuorman pinta-alayksikköä kohden yhteenlaskettu massa [kg/m^2].

Ominaistaajuuden lisäksi kävelystä aiheutuvan värähtelyn mitoituksessa tarkastellaan 1 kN:n pistekuormasta aiheutuvaa hetkellistä taipumaa. Kansallisen liitteen mukaan puuvälipohjissa sallitaan 0,5 mm:n hetkellinen taipuma 1 kN:n pistekuormasta lattiapalkin kohdalla. Tämän taipuman lisäksi sallitaan 0,5 mm:n hetkellinen taipuma pintarakenteessa, kuten palkkien välisessä levyrakenteessa. (Ympäristöministeriö 2007a) Massiivipuisen lattiarakenteen taipumarajasta kansallinen liite ei kuitenkaan anna ohjetta. Monesti onkin päädytty käyttämään 0,5 mm:n taipumarajaa koko laatan hetkelliselle taipumalle (katso esim. Lahtela 2014a ja CrossLam 2015).

Kahdelta sivulta tuetun lattiarakenteen taipuma voidaan laskea kaavalla (Ympäristöministeriö 2007a)

$$\delta = \min \left\{ \frac{Fl^2}{42 \cdot k_\delta \cdot (EI)_l}, \frac{Fl^3}{48 \cdot s \cdot (EI)_l} \right\}$$

missä

F = 1 kN:n pistekuorma

s = lattiapalkkien välinen etäisyys (CLT:n tapauksessa 1 m, kun lattia mitoitetaan metrin levyisenä kaistana)

$$k_{\delta} = \sqrt[4]{\frac{(EI)_b}{(EI)_l}}, \text{ rajoituksena } k_{\delta} \leq b/l.$$

Neljältä sivulta tuetun lattiarakenteen taipuma voidaan laskea samoilla kaavoilla, mutta kerrointa k_{δ} ei tarvitse rajoittaa tekijällä $\leq b/l$ (Ympäristöministeriö 2007a). Taipumarajalle on esitetty kansallisessa liitteessä myös korotuskerroin, jota voi käyttää silloin, kun tilan sivumitat ovat alle 6 m (Ympäristöministeriö 2007a). Tilaelementin pidempi sivumitta on hyvin usein suurempi kuin 6 m, joten korotuskerrointa ei yleensä voi käyttää.

3.1.4 Tukipainekestävyys

Kun CLT-levyä kuormitetaan tasoa vastaan kohtisuorassa suunnassa, on kaikkien lauterkerrosten syysuunta kohtisuorassa kuormitukseen nähden. Sahatavaran syytä vastaan kohtisuora puristuslujuus on vain noin kymmenesosa syyn suuntaisesta puristuslujuudesta, joten CLT:n puristuskestävyys on lappeellaan kuormitettuna huomattavan heikko. Tukipainekestävyyden laskennassa puristuslujuutta saa kasvattaa tukipainekertoimella. Tehollisen kosketuspinnan pituutta voidaan levittää pintalamellin suunnassa korkeintaan 30 mm tukipinnan molemmin puolin, niissä rajoissa kuin levypinta jatkuu tukipinnan ympärillä (ProHolz 2014; EN 1995-1-1).

Tukipaine tulee tarkastaa aina, kun CLT-levy kuormittuu liitoksessa tasoa vastaan kohtisuorassa suunnassa. Tilaelementtikerrostalossa tällainen tilanne voi tulla esimerkiksi sellaisessa rakenneratkaisussa, jossa tilaelementin kattolaatta jää yläpuolisen ja alapuolisen kerroksen seinien väliin. Seinien pystykuormat ovat varsin suuria, joten kattolaa-
tan tukipainekestävyys voi tulla merkitseväksi.

3.2 CLT:n mitoitus syrjällään

Syrjällään kuormitetut CLT-levyt ovat pääasiassa seinäelementtejä. Syrjällään kuormitetun CLT-levyn mitoitus on yksinkertaisempaa kuin lappeellaan kuormitetun, sillä taiputus-, veto- ja puristuskestävyyden mitoituksessa ei tarvitse huomioida poikkisuuntaisia lamelleja. Kuormaa kantavina huomioidaan siis ainoastaan ne lamellit, joissa syyn suunta ja kuormituksen aiheuttama jännitys ovat samansuuntaisia. (Kevarinmäki 2014)

CLT:n mitoitusperiaatteet riippuvat melko paljon valmistajakohtaisista ohjeista. Erityisesti leikkausmitoituksen osalta vakiintuneita ohjeistuksia CLT:n mitoitukseen ei vielä ole. Suomessa on annettu CLT:n mitoitusohjeita Stora Enson ja CrossLamin tuotteille.

Mitoitusperiaatteet on tässä työssä esitelty pääasiassa näiden ohjeiden mukaan, täydentäen tietoja myös muista lähteistä.

3.2.1 CLT:n taivutusmitoitus syrjällään

Syrjällään taivutettua CLT:tä on esimerkiksi aukkojen ylä- ja alapuolisissa aukkopalkeissa. Taivutusmitoituksessa kuormaa kantavina huomioidaan ainoastaan ne kerrokset, jotka ovat samansuuntaisia kuormituksen aiheuttamien jännitysten kanssa, eli aukkopalkkien tapauksessa vaakasuuntaiset lamellit. Kolmelamellisessa seinässä ainoa vaakasuuntainen lamelli on levyn keskellä, jolloin aukkopalkin taivutusmitoitusta tehdään pelkästään keskilamellille. Taivutusmitoitusta tehdään normaalin sahatavarapalkin tapaan poikkileikkaukselle, jonka korkeus on aukkopalkin korkeus ja leveys on vaakasuuntaisten lamellien paksuuksien summa.

Suunnittelussa on huomioitava, että CLT-levyssä olevien aukkojen ylä- ja alapuolelle jää riittävästi ehjää CLT:tä aukkopalkeiksi. Aukkopalkit siirtävät välipohjilta tulevat kuormat viereisille ehjille seinäosuuksille tukireaktioiden kautta. Leveät aukot kasvattavat viereisten seinäosuuksien pystykuormia, joten aukkojen ympärillä tulee olla riittävän paljon ehjää CLT-seinää, jotta seinän pystykuormakestävyys ei ylittyisi.

3.2.2 CLT:n leikkausmitoitus syrjällään

Syrjällään kuormitettuun CLT:hen syntyviä leikkausjännityksiä on tutkittu paljon. Syrjällään kuormitetulla CLT:llä on todettu olevan kolme erilaista leikkausmurtotapaa. (Brandner ym. 2016) Ensimmäinen murtotapa on pituus- tai poikkisuuntaisten lamellien murtuminen risteävän sauman kohdalta. Tätä murtotapaa on havainnollistettu kuvassa 3.3. Leikkauskestävyys tarkistetaan joko pituus- tai poikkisuuntaisille lamelleille sen mukaan, kumman nettopoikkileikkauksen leikkauspinta-ala on pienempi. (ProHolz 2014) Leikkausjännitys voidaan laskea kaavalla (ProHolz 2014; Keväinmäki 2014)

$$\frac{V_d}{\min \begin{cases} A_{0,net} \\ A_{90,net} \end{cases}} \leq f_{v,net,d}$$

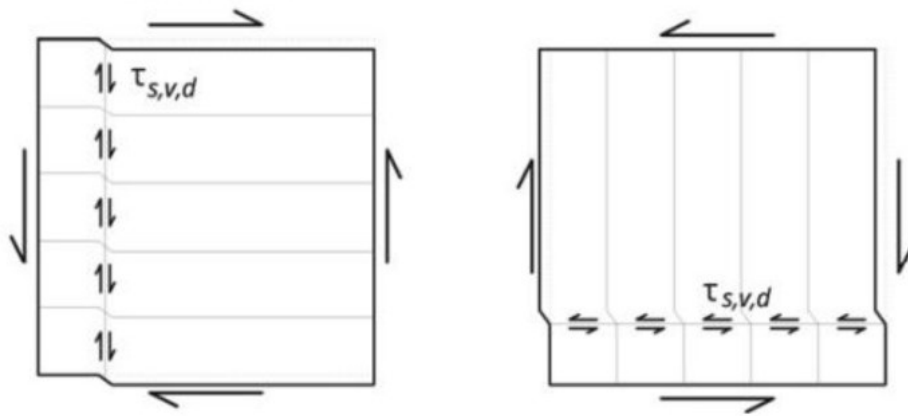
missä

V_d = ulkoisen leikkausvoiman mitoitusarvo

$A_{0,net}$ = pituussuuntaisten lamellien muodostaman nettopoikkileikkauksen leikkauspinta-ala

$A_{90,net}$ = poikittaisten lamellien muodostaman nettopoikkileikkauksen leikkauspinta-ala

$f_{v,net,d} =$ nettopoikkileikkauksen leikkauslujuuden mitoitusarvo.



Kuva 3.3. Murtotapa 1: Lamellien leikkausmurto risteävän sauman kohdalla. (ProHolz 2014)

Toinen murtotapa on risteävien pintojen liimasauman vääntöleikkaus, jota on havainnollistettu kuvassa 3.4. Voimien oletetaan välittyvän laudalta toiselle ainoastaan ristikkäisen kerroksen liimapinnan kautta riippumatta siitä, ovatko laudat syrjäliimattuja vai eivät. Risteäviin pintoihin syntyvä vääntöleikkajännitys voidaan laskea kaavalla (Kervarinmäki 2014)

$$\tau_{t,d} = \frac{V_d \cdot b_1 \cdot b_2}{2 \cdot m \cdot n \cdot I_p} \leq f_{tv,d}$$

missä

$\tau_{t,d} =$ vääntöjännitysten mitoitusarvo

$V_d =$ ulkoisen leikkausvoiman mitoitusarvo

$b_1 =$ pituussuuntaisten lautojen leveys

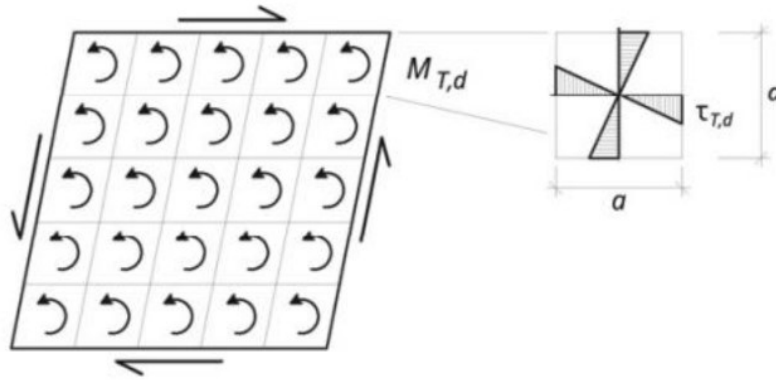
$b_2 =$ poikittaisten lautojen leveys

$m =$ pituussuuntaisten kokonaisten lautojen lukumäärä yhdessä kerroksessa

$n =$ risteävien liimauspintojen lukumäärä poikkileikkauksessa

$I_p =$ risteävän alueen ($b_1 \cdot b_2$) polaarinen jäyhyysmomentti.

$f_{tv,d} =$ lautojen välisen liimasauman vääntöleikkauslujuuden mitoitusarvo.



Kuva 3.4. Murtotapa 2: Risteävien pintojen vääntöleikkaus. (ProHolz 2014)

Kuvassa 3.5 on esitetty kolmas murtotapa, jossa koko CLT-poikkileikkaus murtuu massiivisena poikkileikkauksena. Tämä murtotapa voi esiintyä silloin kun syrjät on liimattu toisiinsa tai lamelleissa ei ole rakoja ja halkeamia. (Brandner ym. 2016) Tässä murtotavassa käytetään sahatavaran syytä vastaan kohtisuoran leikkauslujuuden arvon sijasta koko CLT-poikkileikkaukselle määritettyä leikkauslujuuden mitoitusarvoa. Leikkausjännitys lasketaan kaavalla (ProHolz 2014)

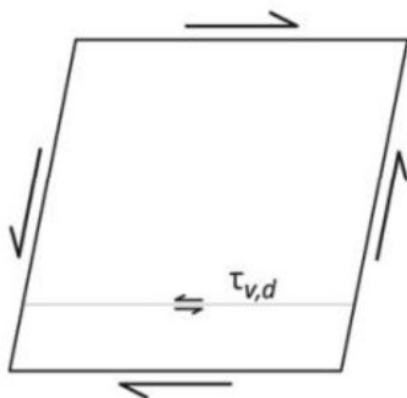
$$\frac{V_d}{A_{gross}} \leq f_{v,gross,d}$$

missä

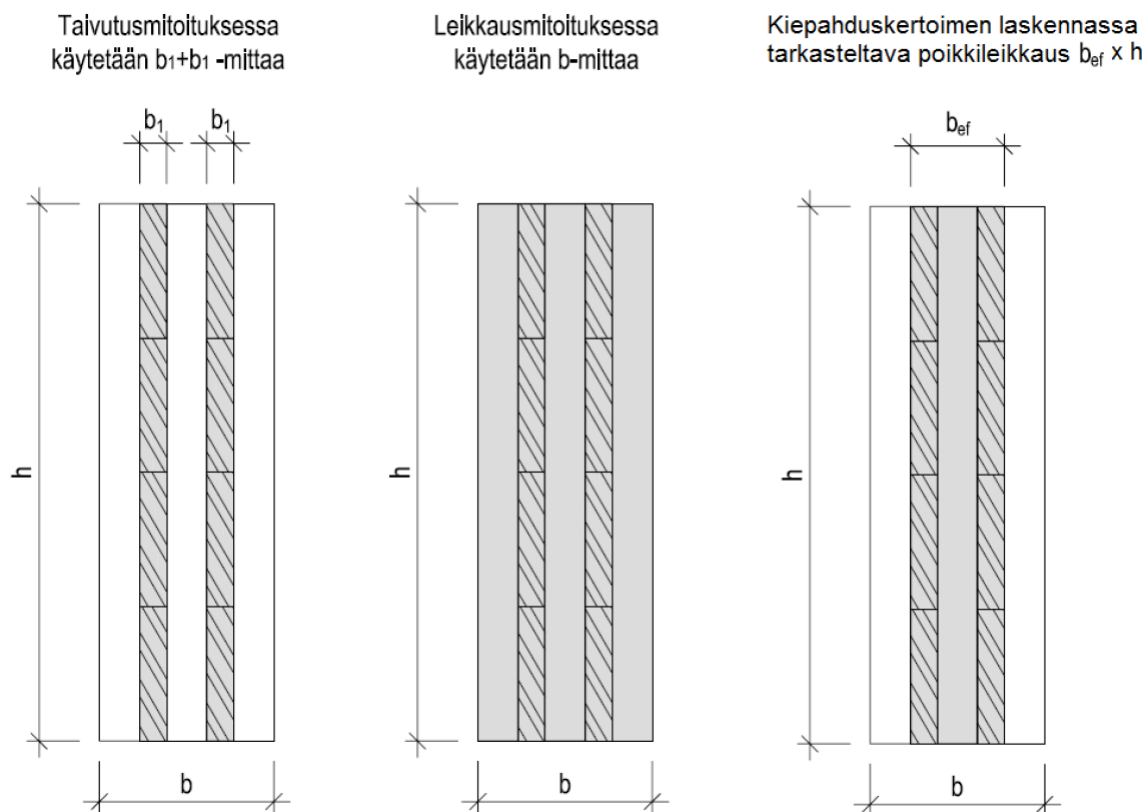
V_d = ulkoisen leikkausvoiman mitoitusarvo

A_{gross} = CLT-poikkileikkauksen kokonaispinta-ala (kaikki lamellit huomioiden)

$f_{v,gross,d}$ = koko CLT-poikkileikkaukselle määritetty leikkauslujuuden mitoitusarvo.



Kuva 3.5. Murtotapa 3: Levyn leikkausmurtuminen massiivisena poikkileikkauksena. (ProHolz 2014)

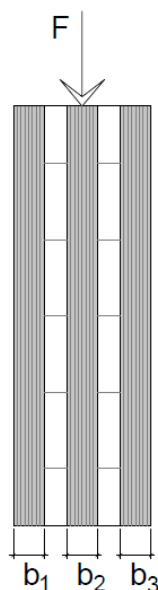


Kuva 3.6. Tarkasteltava poikkileikkaus, kun CrossLamin CLT-levyä mitoitetetaan syrjällä. (VTT Expert Services Oy 2014)

CrossLamin tuotteille syrjäleikkausmitoitus voidaan tehdä edellä esitetystä poikkeavalla periaatteella. Leikkausmitoitus voidaan tehdä massiiviselle poikkileikkaukselle käyttäen jokaiselle levytyypille erikseen määritettyä leikkauskestävyyttä. (VTT Expert Services Oy 2014) Tuotteille määritetyt leikkauskestävyydet ottavat jo valmiiksi huomioon erilaiset murtotavat.

3.2.3 CLT:n normaalivoimamitoitus syrjällä

Syrjällä kuormitetun CLT-levyn normaalivoimamitoituksessa huomioidaan tehollisena poikkileikkauksena ainoastaan kuorman suuntaiset lamellit. Kun CLT-seinää mitoite-taan pystykuormille, ainoastaan pystysuuntaiset lamellit oletetaan siis kuormaa kanta-viksi. Mitoitus tehdään sahatavarapilarin tapaan, mutta poikkileikkauksena käytetään kuvassa 3.7 havainnollistettua tehollista poikkileikkausta, josta on jätetty poikittaisten lamellien osuus huomioimatta. Puristuslujuutena käytetään sahatavaran lujuusluokan mukaisia syyn suuntaisia arvoja.



Kuva 3.7. Puristetun CLT-seinän tehollisen poikkileikkauksen leveys $b_1 + b_2 + b_3$.

Seinän pystykuormakestävyys laskennassa huomioidaan sekä puristuskestävyys että nurjahduskestävyys. Yleensä CLT-seinä on niin leveä, että vahvemman suunnan nurjahdusta ei tarvitse tarkistaa. (ProHolz 2014) Seinän mitoituksessa on syytä huomioida myös epäkeskeisyydestä aiheutuva momentti.

3.3 Paloturvallisuus

Paloturvallisuus ja siihen liittyvä lainsäädäntö on ollut keskeisin osa-alue puukerrostalojen kehityksessä. Palomääräykset ovat olleet suurin hidaste puukerrostalojen rakentamiselle, mikä näkyy siinä, että ensimmäiset yli 2-kerroksiset puukerrostalot rakennettiin heti palomääräysten uudistusprosessin myötä. (Karjalainen 2002)

1800-luvun tuhoisista kaupunkipaloista lähtien palolainsäädäntö oli kehittynyt siten, että puun käyttöä rajoitettiin yli kaksikerroksisissa rakennuksissa. Vasta vuonna 1997 Rakentamismääräyskokoelman osaa E1 uudistettiin siten, että se salli 3- ja 4-kerroksisten asuin- ja työpaikkarakennusten rungon materiaaliksi puun, mikäli vaatimukset pintamateriaalien ja eristeiden rakennustarvikeluokista täyttyivät ja rakennus varustettiin automaattisella sammutuslaitteistolla, kuivανousujohdolla ja sähköverkkoon kytketyillä palovaroitinilla. Lisäksi puun käyttö julkisivuverhouksena sallittiin, mikäli palon leviäminen ulkoseinän pinnassa ja tuuletusraossa rajoitettiin katkoin ja rakennus varustettiin automaattisella sammutuslaitteistolla. Puukerrostalolta edellytettiin siis varsin raskasta suojaustasoa. (Karjalainen 2002; RakMK E1 1997)

Rakentamismääräyskokoelman osaa E1 uudistettaessa vuonna 2002 määräykseen sisällytettiin eurooppalaiset rakennustuotteiden paloteknisiä käyttäytymistä koskevat euroluokat ja myöskin suojaverhousten ja katteiden luokitus muutettiin eurooppalaisen järjes-

telmän mukaiseksi. Uudet luokitukset pyrittiin tekemään siten, että ne vastaisivat mahdollisimman hyvin toisiaan, vaikka määrittelyt ja testausmenetelmät poikkesivatkin vanhasta luokituksista. (Weckman 2003) Muutoksia puukerrostalojen suojaverhousvaatimuksille ei siis käytännössä tullut uudistuksen myötä. Puukerrostalon julkisivujen palokatkoja koskeva teksti kuitenkin muotoiltiin uudelleen siten, että se ei enää määritellyt katkojen sijoittamista sekä julkisivun ulkopintaan että tuuletusrakoon. Uusi määräys edellytti, että palon leviäminen seinässä on estetty riittävän tehokkaasti, ottamatta kantaa estämistapaan. (RakMK E1 2002)

Vuonna 2009 asetettiin työryhmä, jonka tarkoituksena oli selvittää, mitkä rakentamismääräykset aiheuttavat tarpeetonta haittaa puurakentamisen edistämiseksi. Selvitystyön perusteella tehtiin uudistus Rakentamismääräyskokoelman osaan E1 vuonna 2011. Rakentamismääräyskokoelmaa tarkennettiin ja laajennettiin erityisesti D-s2, d0-luokan rakennustarvikkeiden (puumateriaalin) käytön osalta. Merkittävin uudistus oli se, että puukerrostalojen rakentaminen sallittiin paloluokassa P2 aina kahdeksaan kerrokseen asti. Myös puun käyttömahdollisuuksia julkisivumateriaalina ja sisätilojen pintamateriaalina laajennettiin, mutta toisaalta lisättiin myös uusi vaatimus tuuletusraon sisäpinnan suojaverhouksesta. Suojaverhouksissa otettiin käyttöön K₂-luokat. (Jantunen 2012)

Koska korkea puukerrostalorakentaminen tuli mahdolliseksi vasta 2010-luvulla, on korkean puurakentamisen mahdollistavien järjestelmien kehitystyö ollut Suomessa ajankohtaista. Palomääräysten kehittyminen tulee saamaan jatkoa, sillä diplomityön kirjoitusajankohtana oli valmisteilla uusi versio palomääräyksistä (Ympäristöministeriö 2016). Diplomityössä palomääräykset on kuitenkin esitetty kirjoitushetkellä voimassa olleiden määräysten mukaisesti.

3.3.1 Pintaluokat ja suojaverhoukset

3-8-kerroksisten P2-luokan asuinrakennusten paloturvallisuutta säännellään erityisesti rakenteiden suojaverhousvaatimuksilla sekä rakennustarvikkeiden luokkavaatimuksilla. CLT-tuotteet voidaan ilman testausta määrittää rakennustarvikeluokkaan D-s2, d0 (EOTA 2015). Palosuojakäsittelyllä voidaan päästä käsittelystä riippuen luokkiin C tai B. Kun CLT:tä käytetään lattiapintana, sen luokka on D_{FL}-s1. (Puuinfo 2012)

Rakentamismääräyskokoelman osassa E1 (2011) on käytössä kaksi suojaverhoustyyppiä: K₂10 ja K₂30. Ensimmäisessä suojattavan puurakenteen täytyy säilyä hiiltymättömänä 10 minuutin ajan ja jälkimmäisessä 30 minuutin ajan. Suojaverhousvaatimuksen K₂10 täyttää esimerkiksi tavallinen 13 mm:n kipsilevy. Eurokoodin laskukaavan mukaan 15 mm:n F-tyyppin palokipsilevy ei yksinään riitä täyttämään K₂30-luokan suojaverhousvaatimusta, koska suojattava rakenne alkaa hiiltä 28 minuutin kohdalla. Vaatimus saadaan kuitenkin täytettyä yhdellä 18 mm:n kipsilevyllä tai kaksinkertaisella 13 mm:n tai 15 mm:n kipsilevytyksellä.

Taulukko 3.1. Porrashuoneen ja asuntojen suojaverhous- ja pintaluokkavaatimukset kahdelle erilaiselle puukerrostalotyypille Suomen Rakentamismääräyskokoelman osan E1 (2011) mukaan.

	3 - 4 KERROSTA (2-luokan sprinkleri)		5 - 8 KERROSTA (OH-luokan sprinkleri)	
PORRASHUONE	Suojaverhous	Näkyvä pinta	Suojaverhous	Näkyvä pinta
Seinä- ja kattopinnat	K ₂ 10 / A2-s1, d0	A2-s1, d0	K ₂ 30 / A2-s1, d0	A2-s1, d0
Esimerkkimateriaali	Kipsilevy	Kipsilevy	Kipsilevy	Kipsilevy
Lattiapinnat	-	D _{FL} -s1	K ₂ 30 / A2-s1, d0	D _{FL} -s1
Esimerkkimateriaali		Muovimatto	Valulattia	Muovimatto
Porraskanteet (pl. askelmapinnat)	K ₂ 30 / A2-s1, d0	A2-s1, d0	K ₂ 30 / A2-s1, d0	A2-s1, d0
Esimerkkimateriaali	Kipsilevy	Kipsilevy	Kipsilevy	Kipsilevy

ASUNNOT	Suojaverhous	Näkyvä pinta	Suojaverhous	Näkyvä pinta
Kevyet väliseinät	K ₂ 10 / A2-s1, d0	B-s1, d0*	-	D-s2, d2
Esimerkkimateriaali	Kipsilevy	Kipsilevy		Kipsilevy, puu
Saunan seinäpinnat	K ₂ 10 / A2-s1, d0	D-s2, d2	K ₂ 30 / A2-s1, d0	D-s2, d2
Esimerkkimateriaali	Kuitusementtilevy	Puupaneeli	Kuitusementtilevy	Puupaneeli
Saunan kattopinta	K ₂ 10 / A2-s1, d0	D-s2, d2	K ₂ 30 / A2-s1, d0	D-s2, d2
Esimerkkimateriaali	Kuitusementtilevy	Puupaneeli	Kuitusementtilevy	Puupaneeli
Seinä- ja kattopinnat yleensä	K ₂ 10 / A2-s1, d0	B-s1, d0*	K ₂ 30 / A2-s1, d0	D-s2, d2
Esimerkkimateriaali	Kipsilevy	Kipsilevy	Kipsilevy	Kipsilevy, puupaneeli
Kaikki lattiapinnat	-	-	K ₂ 30 / A2-s1, d0	-
Esimerkkimateriaali			Valulattia	

* D-s2, d2 (puu), mikäli asunnossa on OH-luokan sprinklaus

3-4-kerroksisen puukerrostalon seinä- ja kattopintoihin vaaditaan yleensä K₂10-luokan suojaverhoukset. 5-8-kerroksisessa puukerrostalossa vaaditaan puolestaan K₂30-luokan suojaverhoukset, myös lattioissa. Asunnoissa suojaverhouksen päälle saa tehdä puuverhouksen D-s2, d0-luokan tarvikkeista, mikäli tilassa on OH-luokan sprinkleri. Porrashuoneessa pintaluokkavaatimukset ovat sen sijaan tiukemmat: näkyvä puupinta sallitaan vain portaiden askelmapinnoissa. (RakMK E1 2011) Porrashuoneen ja asuntojen suojaverhoukset- ja pintaluokkavaatimukset on esitetty taulukossa 3.1.

Taulukko 3.2. Puujulkisivujen suojaverhoukset- ja pintaluokkavaatimukset kahdelle erilaiselle puukerrostalotyypille Suomen Rakentamismääräyskokoelman osan E1 (2011) mukaan.

JULKISIVUT YLEENSÄ	3 - 4 KERROSTA (2-luokan sprinkleri)		5 - 8 KERROSTA (OH-luokan sprinkleri)	
	Suojaverhous	Pinta	Suojaverhous	Pinta
Tuuletusraon sisäpinta	K210 / A2-s1, d0	B-s1, d0	K230 / A2-s1, d0	B-s1, d0
Esimerkkimateriaali	Tuulensuojamineraalivilla	Tuulensuojamineraalivilla	Tuulensuojamineraalivilla	Tuulensuojamineraalivilla
Verhouksen sisä- ja ulkopinta	-	D-s2, d2	-	D-s2, d2
Esimerkkimateriaali		Puuverhous		Puuverhous

JULKISIVUT MAANTASOKERROKSEN JA ULOSKÄYTÄVINÄ / VARATEINÄ TOIMIVIEN AUKKOJEN KOHDALLA

	Suojaverhous	Pinta	Suojaverhous	Pinta
Tuuletusraon sisäpinta	K210 / A2-s1, d0	B-s1, d0	K210 / A2-s1, d0	B-s1, d0
Esimerkkimateriaali	Tuulensuojamineraalivilla	Tuulensuojamineraalivilla	Tuulensuojamineraalivilla	Tuulensuojamineraalivilla
Verhouksen sisä- ja ulkopinta	-	B-s2, d0	-	B-s2, d0
Esimerkkimateriaali		Palosuojakäsitelty puu		Palosuojakäsitelty puu

Puun käyttö julkisivuverhouksessa sallitaan, mikäli erityisehdot täyttyvät. Nämä erityisehdot käydään läpi seuraavassa alaluvussa. Julkisivuissa ehtoja asetetaan sekä tuuletusraon sisäpinnalle että julkisivuverhouksen ulko- ja sisäpinnoille. Tuuletusraon sisäpinnassa vaaditaan suojaverhous, joka voidaan toteuttaa esimerkiksi tarkoitukseen sopi-

valla tuulensuojamineraalivillalla. Maantasokerroksessa ja uloskäytävinä tai varateinä toimivien aukkojen kohdalla verhouksen sisä- ja ulkopinnan tulee täyttää luokkavaatimus B-s2, d0. Tämä voidaan saavuttaa esimerkiksi julkisivulautojen molemminpuolisella palosuojakäsittelyllä (Puuinfo 2013b). Puujulkisivujen suojaverhouk- ja pintaluokkavaatimukset on esitetty taulukossa 3.2.

Puisilta parvekerakenteilta edellytetään suojaverhousta, jonka rakennustarvikeluokka on A2-s1, d0. Sälle alttiiden puurakenteiden verhoaminen esimerkiksi kipsilevyillä on kuitenkin osoittautunut kosteusteknisesti huonoksi vaihtoehdoksi. Tähän on esitetty ratkaisuksi suojaverhouksen korvaamista parvekkeen sprinklauksella. (Puuinfo 2013a) Tätä periaatetta onkin sovellettu useimmissa kohdeaineiston puukerrostaloissa.

3.3.2 Palon leviämisen rajoittaminen

Rakentamismääräyskokoelman osa E1 (2011) antaa P2-luokan 3-8-kerroksiselle puukerrostalolle lisämääräyksiä, joilla pyritään rajoittamaan palon leviämistä. Puukerrostalot tulee varustaa rakennuksen korkeudesta riippuen joko 2-luokan tai OH-luokan sprinklerillä. OH-luokan sprinkleri vaaditaan kaikissa 5-8-kerroksisissa puukerrostaloissa. OH-luokan sprinkleri vaaditaan myös 3-4-kerroksisissa puukerrostaloissa siinä tapauksessa, jos sisäpuolisissa katto- ja seinäpinnoissa käytetään puuverhouksia.

Lisämääräyksiä annetaan myös palon leviämisen rajoittamisesta puuverhoillussa julkisivussa. Polttokokeissa on havaittu, että palo ei niinkään leviä julkisivun ulkopinnalla, vaan sen takana olevassa ontelossa (Puuinfo 2016b). Kun käytetään puujulkisivua, palon leviämistä tuuletusraossa tulee rajoittaa vähintään kerroksittain. Myös palon leviämistä vaakasuunnassa porrashuoneen ulkoseinän tuuletusrakoon tulee hidastaa. (RakMK E1 2011) Palon leviämisen rajoittamiseen on keksitty ratkaisuksi tuuletusrakoon asennettava rei'itetty palokatkoprofiili. Vaakasuuntaisia palokatkoja tulee olla 1 kpl kerrosta kohti. Niiden lisäksi tarvitaan myös pystysuuntaiset tiiviisti asennetut kooauspuut, jotka jakavat tuuletusraon noin 600 mm:n kaistoihin. Palokatkoprofiilien sijasta voidaan käyttää myös onteloventtiilejä, joiden sulkeutuminen perustuu palossa laajenevaan materiaaliin. (Puuinfo 2016b)

Toinen julkisivupalon rajoittamiseen liittyvä määräys on se, että puuverhoillussa puukerrostalossa palon leviäminen julkisivusta yläpohjaan ja ullakkoon tulee estää EI30-rakenteella (RakMK E1 2011). Tämä estetään paloräystäsrakenteella sekä ullakon ja yläpohjan ontelon vastaisen seinän osastoivuudella. Paloräystä voidaan toteuttaa räystään alapinnassa olevalla osastoivalla levyllä. Yläpohjan korvausilma otetaan otsalaudassa olevista aukoista tai tarkoitukseen suunnitelluilla venttiileillä. (Puuinfo 2016a)

Kolmas julkisivupalon rajoittamista koskeva määräys on alimman kerroksen julkisivun pintaluokkavaatimus B-s2, d0 (RakMK E1 2011). Tällä pyritään rajoittamaan esimerkiksi auton tai roskalaatikon syttymisestä aiheutuvan palon leviämistä (Puuinfo 2016b).

Kohdeaineistossa tämä vaatimus on täytetty joko toteuttamalla maantasokerros betoni-rakenteisena tai suojaamalla alimman kerroksen puuverhous palonsuojakäsittelyllä, kuten kuvassa 3.8.



Kuva 3.8. Ensimmäisen kerroksen palonsuojakäsiteltyä puujulkisivua As. Oy Jyväskylän Puukuokka 1:ssä. (Kuva: Lauri Lepikonmäki)

Muita erityisesti puukerrostaloja koskevia lisämääräyksiä ovat julkisivun laajojen osien putoamisen estäminen sekä kieltä rakennusten tai rakennelmien sijoittamisesta alle 8 metrin etäisyydelle julkisivusta, mikäli palon leviämistä julkisivuun ei estetä rakenteellisin tai muin keinoin (RakMK E1 2011).

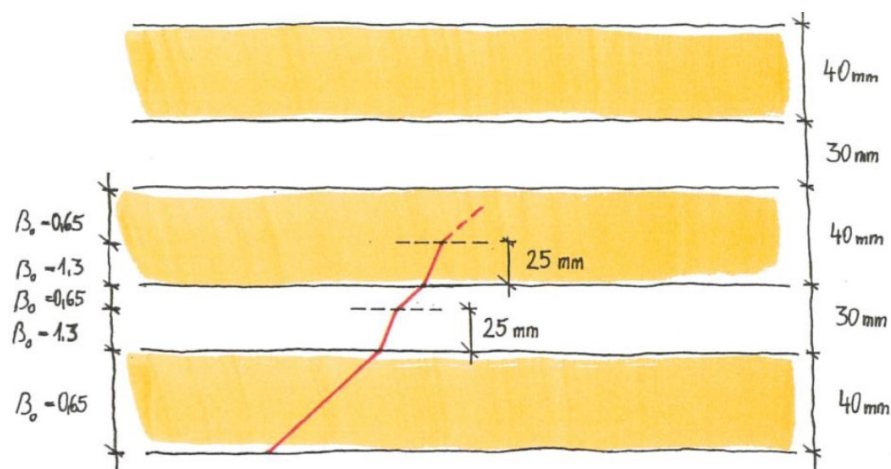
3.3.3 Kantavien rakenteiden palomitoitus

Rakentamismääräyskokoelman osassa E1 (2011) määrätään, että P2-luokan 3-8-kerroksisen asuinkerrostalon kantavat rakenteet tulee suunnitella luokkaan R60. Kantavien CLT-rakenteiden palomitoitus voidaan tehdä kolmella eri periaatteella:

- 1) CLT suojataan levytyksellä siten, että palotilanteessa CLT ei pääse hiiltymään. Kantava rakenne säilyttää täyden kapasiteettinsa palon aikana.
- 2) Levytys suojaa CLT:tä vain palon alkuvaiheessa ja sen jälkeen myös CLT pääsee hiiltymään. Jäljelle jäävä hiiltymätön poikkileikkaus kantaa palotilanteen kuormat.
- 3) Suojaamaton CLT-pinta altistuu palolle ja jäljelle jäävä hiiltymätön poikkileikkaus kantaa palotilanteen kuormat. (Stora Enso 2016a)

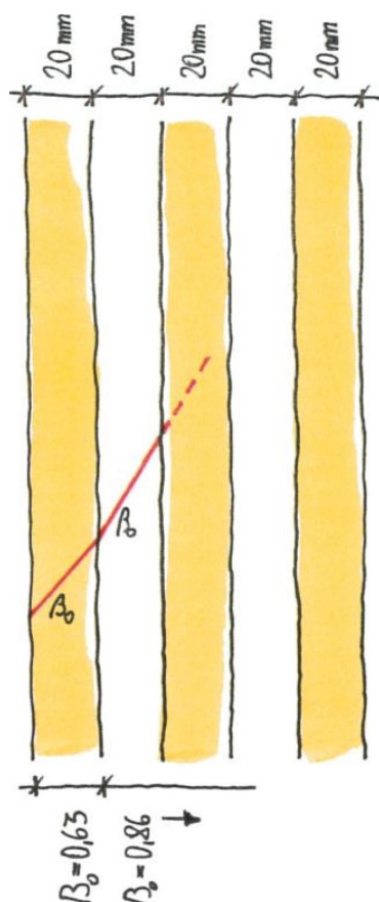
P2-luokan puukerrostalossa suojaverhousvaatimukset johtavat siihen, että CLT-pinnat verhoillaan pääsääntöisesti kipsilevyllä. Kohdeaineiston rakennelaskelmissa olikin yleisimmin päädytty käyttämään periaatetta 2. Myös periaatetta 3 oli sovellettu tilaelementin kattolevyissä, joiden kuormat ovat varsin pieniä.

Kerroksellisesta rakenteesta johtuen CLT:n hiiltymiskäyttäytyminen on erilaista kuin yhtenäisillä puulevyillä. On todettu, että CLT-laatoille voidaan soveltaa Eurokoodin antamia ohjeita suojaverhotun rakenteen palomitoituksesta. CLT:n lamellit voidaan nähdä erillisinä levykerroksina, jotka suojaavat aina seuraavaa kerrosta. Hiiltyneellä kerroksella on hyvät eristysominaisuudet, joten se hidastaa takanaan olevan puun hiiltymistä. Suojaamattomalle ensimmäiselle lamellille voidaan käyttää Eurokoodin EN 1995-1-2 (2015) mukaista hiiltymisnopeuden mitoitusarvoa $\beta_0 = 0,65 \text{ mm/min}$. Hiiltynyt lamelli kuitenkin menettää jossain vaiheessa liimatartuntansa ja putoaa alas, jolloin seuraava lamelli altistuu palolle ilman suojaavaa hiiltynyttä kerrosta. Eurokoodin mukaan hiiltyminen etenee suojaavan kerroksen murtumisen jälkeen kaksinkertaisella nopeudella ($1,3 \text{ mm/min}$) aina 25 mm :n syvyyteen saakka. Sen jälkeen hiiltymisnopeus palaa taas takaisin alkuperäiseen arvoonsa. Tätä palomitoituksen periaatetta on havainnollistettu kuvassa 3.9. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää koko poikkileikkaukselle keskimääräistä hiiltymisnopeutta. (Klippel ym. 2016)



Kuva 3.9. CLT-laatan hiiltyminen. (Stora Enso 2016b)

Edellä kuvattua hiiltymiskäyttäytymistä voidaan soveltaa laattaelementeillä. Polttokokeissa tällainen hiiltymiskäyttäytyminen ei kuitenkaan ole ollut yhtä ilmeistä seinäelementeille, joissa hiiltynyt kerros ei yhtä helposti putoa pois. Seinäelementeissä hiiltymisen tapahtuu lineaarisemmin ja sen nopeudeksi on esitetty erilaisia arvoja. (Klippel ym. 2016) Stora Enso (2016b) on päätenyt asiantuntijalausunnon perusteella kuvan 3.10 mukaiseen hiiltymiskäyttäytymiseen. Diplomityön soveltavassa osuudessa tehdyissä laskelmissa hiiltymä ei ulotu ensimmäistä lamellia syvemmälle, joten tarkasteluissa käytettiin seinille vain yhtä Eurokoodin mukaista hiiltymisnopeutta $\beta_0 = 0,65 \text{ mm/min}$.



Kuva 3.10. CLT-seinän hiiltyminen. (Stora Enso 2016b)

Kerroksellisesta rakenteesta johtuen yksittäisten kerrosten lukumäärä ja paksuus vaikuttavat siihen, millainen jäljelle jäävästä tehollisesta poikkileikkauksesta muodostuu. Kestävyyden kannalta merkittävintä on se, kuinka suuri osa kantavassa suunnassa olevista lamelleista jää jäljelle, sillä poikittaisten kerrosten hiiltymisellä ei ole juuri ollenkaan vaikutusta rakenteen kapasiteettiin (Klippel ym. 2016). Erityisesti ensimmäisenä hiiltyvän uloimman lamellin paksuudella voi olla merkitystä, sillä uloin lamelli on yleensä aina kantavassa suunnassa. CLT-rakenteen kestävyyttä palotilanteessa voidaan lisätä kolmella eri tavalla:

- 1) **Käytetään paksumpaa CLT:tä.** Tällöin jäljelle jäävä tehollinen poikkileikkaus on suurempi.
- 2) **Säilytetään CLT:n paksuus samana, mutta lisätään lamellien lukumäärää.** Esimerkiksi 5- ja 7-kerroksisessa CLT:ssä kantavaan suuntaan olevia lamelleja myös levyn keskellä, jossa ne ovat paremmin suojassa palolta.
- 3) **Lisätään suojaverhousta.** Suojaverhouksen lisäämisellä voidaan rajoittaa CLT:n hiiltymistä tai estää se kokonaan. (Stora Enso 2016b)

Palomitoitus tehdään teholliselle poikkileikkaukselle samoilla periaatteilla kuin käyttölämpötilassa, huomioiden lamellien muuttuneet paksuudet ja lukumäärät. Toispuoleises-

ta hiiltymisestä mahdollisesti aiheutuva lisäepäkeskeisyys tulisi kuitenkin myös huomioida laskennassa. Jos lamellin paksuudesta jää jäljelle alle 3 mm, sitä ei huomioida tehollisessa poikkileikkauksessa. (Stora Enso 2016b)

Kuten edellä todettiin, CLT-rakenteet palomitoitetaan useimmiten suojaverhottuina. Tehokkain suojaverhous saavutetaan F-tyyppin kipsilevyllä eli palokipsilevyllä. Eurokoodi EN 1995-1-2 ei anna F-tyyppin kipsilevyn murtumishetkeä t_f , vaan se on määritettävä kokeellisesti. Sillä, miten suojaverhouksen murtumishetki määritellään, on olennainen merkitys CLT-rakenteen kestävyyyteen palossa. Kokeellisesti määritettyjä arvoja on kuitenkin vaikeasti saatavilla. Stora Enson asiantuntijalausunnon perusteella suoraan CLT:n päälle asennetun 12,5 mm:n DF-tyyppin kipsilevyn murtumishetkenä voidaan käyttää arvoa 55 min (Stora Enso 2016b). Puurakenteiden suunnitteluohje RIL 205-2-2009 (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 2009b) antaa puolestaan 15 mm paksun palokipsilevyn murtohetkeksi $t_f = 50$ min silloin, kun seinärakenne koostuu runkotolpista ja niiden välisistä eristeellä täytetyistä onteloista. Suojattavan rakenteen tyyppi voi kuitenkin vaikuttaa siihen, missä palon vaiheessa levy murtuu, joten CLT-rakenteella arvo voi olla eri.

3.3.4 Taulukkoarvoista poikkeaminen

Palontorjuntamenetelmät voidaan jakaa aktiivisiin ja passiivisiin menetelmiin. Rakenteellinen suojaus on passiivista palontorjuntaa, kun taas automaattiset sammutuslaitteistot ja paloilmaisimet ovat aktiivisia palontorjuntamenetelmiä. (Puuinfo 2015)

Yleensä rakentamismääräyskokoelman osa E1 (2011) sallii lievennyksiä taulukkoarvoihin silloin, kun rakennuksessa käytetään aktiivisia palontorjuntamenetelmiä. P2-luokan puukerrostaloissa lievennyksiä ei kuitenkaan ole mahdollista saada tällä perusteella. Niinpä aktiivisten palontorjuntamenetelmien huomioon ottaminen vaatii puukerrostalossa toiminnallista palomitoitusta. Toiminnallinen palomitoitus onkin osoittautunut vaativien puurakenteiden yhteydessä toimivaksi suunnittelumenetelmäksi, sillä automaattisen sammutuslaitteiston tuomat edut pystytään silloin ottamaan oikealla tavalla huomioon. (Puuinfo 2015)

Toiminnallista palomitoitusta on mahdollista hyödyntää myös siten, että osa rakennuksesta suunnitellaan taulukkomitoituksella ja osa toiminnallisella mitoituksella (Puuinfo 2015). Rakentamismääräyskokoelman taulukoihin on mahdollista tehdä poikkeuksia myös kohdekohtaisten asiantuntijalausuntojen perusteella. Kohdeaineistossa oli tällä perusteella saatu lievennyksiä pintaluokka- ja suojaverhousvaatimuksiin. Lisäksi Puuinfon tekniseen tiedotteeseen (2013a) perustuen on useammassa kohteessa korvattu parvekkeiden suojaverhoukset parvekkeiden sprinklauksella.

3.4 Tilaelementtikerrostalon jäykistysperiaate

Tämän työn kohdeaineiston CLT-tilaelementtikerrostaloissa jäykistys on toteutettu jäykistäviin mastoseiniin perustuvalla jäykistysjärjestelmällä. Kohdeaineistossa käytetty jäykistysjärjestelmä muodostuu tilaelementtien CLT-rungoista ja niiden välisistä liitososista, eikä erillisiä jäykistäviä runkorakenteita, kuten jäykistysristikoita, ole käytetty. Tilaelementtien välipohjarakenne muodostaa tason, jolla vaakakuormat siirretään tilaelementtien jäykistäville CLT-seinille. CLT-tilaelementtikerrostalon jäykistys voidaan toteuttaa myös erillisillä jäykistysrakenteilla, kuten betonirakenteisella porrastorinilla (Stora Enso 2016a). Tässä työssä käsitellään kuitenkin vain jäykistäviin CLT-seiniin perustuvaa vaihtoehtoa ja siihen liittyviä erityiskysymyksiä.

Rakennesuunnittelijoiden haastatteluissa nousi esille, että jäykistysratkaisut ovat olleet suurimpia haasteita rakenne- ja arkkitehtisuunnittelun yhteensovittamisessa (Lepikonmäki 30.11.2016). Jäykistysjärjestelmän geometrian määrää hyvin pitkälle arkkitehtisuunnitelma, jossa tehdyillä valinnoilla on oleellinen vaikutus jäykistyksen onnistumiseen ja suunnittelun työmäärään. CLT-tilaelementtikerrostalon jäykistyksen erityispiirteet johtavat siihen, että rakennuksen pohjaratkaisun merkitys korostuu jo suhteellisen matalilla rakennuskorkeuksilla.

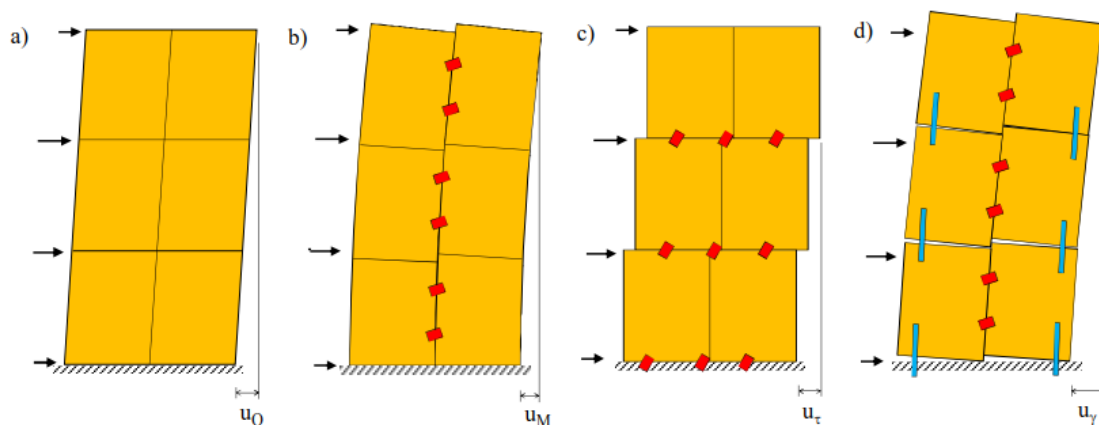
CLT-tilaelementtikerrostalon jäykistyksen erityispiirteiksi mainittiin pienet pystykuormat sekä akustisten vaatimusten aiheuttama liitosten joustavuus ja rakenteiden epäjatkuvuus, jotka pienentävät rakennusrungon jäykkyyttä (Lepikonmäki 30.11.2016). Vaakakuormia välittävä välipohjataso ei ole betonirakenteiden tapaan jäykkä ja monoliittinen, vaan koostuu useista erillisistä levyistä, joiden väliset liitokset eivät ole täysin jäykkiä. Nämä erityispiirteet johtavat siihen, että käyttörajan ilmiöt tulevat määrääviksi jo paljon pienemmillä rakennuskorkeuksilla kuin vastaavissa betonikerrostaloissa. Jotta liitosten jäykkyyksien vaikutukset kuormien jakautumiseen pystytettäisiin huomioimaan mahdollisimman todenmukaisesti, vaatii CLT-tilaelementtikerrostalon jäykistyksen suunnittelu yleensä kehittyneiden laskentamenetelmien käyttöä.

3.4.1 Jäykistävät seinät

CLT-levy on itsessään varsin jäykkä. CLT-tilaelementtikerrostalon jäykistyksen suurimmat haasteet tulevatkin liitosten joustavuudesta. Rakennuksen jäykkyyden kannalta olisi parempi kiinnittää tilaelementit toisiinsa mahdollisimman jäykästi. Rakennuksen akustisen toimivuuden kannalta tilaelementtien tulisi puolestaan olla mahdollisimman irti toisistaan ja kiinnittyä toisiinsa mahdollisimman pehmeästi. Tasapainon löytäminen näiden kahden keskenään ristiriitaisen tavoitteen välillä voi olla hyvin haastavaa.

CLT-tilaelementit kiinnitetään toisiinsa vaaka- ja pystysuunnassa esimerkiksi teräsosilla. Kiinnitysosien määrää pyritään minimoimaan äänen kulkeutumisen rajoittamiseksi. Akustisista syistä teräsosien välissä joudutaan käyttämään ääntä vaimentavia joustavia

kerroksia ja teräsosat olisi hyvä sijoittaa mieluummin sekundääristen tilojen kuin asuinhuoneiden kohdalle. Seinät katkeavat jokaisen kerroksen kohdalla ja myös kerrosten väleihin tarvitaan yleensä ääntä vaimentava joustava kerros. (Stora Enso 2016a) Nämä akustiset ratkaisut heikentävät liitosten jäykkyyttä, minkä johdosta jäykistävät CLT-seinät eivät toimi monoliittisina mastoina. Liitoksissa tapahtuvat siirtymät vaikuttavat rakenteen muodonmuutoksiin, mitä on havainnollistettu kuvassa 3.11. Rakennusrungon pieni jäykkyys ja helposti suuriksi kasvavat siirtymät aiheuttavat sen, että käyttörajatilan ilmiöt saattavat mitoittaa jäykistysjärjestelmän varsinkin korkeammilla rakennuksilla, joissa vaakakuormat aiheuttavat vetoa käyttörajatilassa. Näitä ilmiöitä käsitellään tarkemmin luvussa 3.5.



Kuva 3.11. Vaakakuorman aiheuttamat muodonmuutokset ja liitostavan vaikutus muodonmuutosten syntymiseen: a) leikkausmuodonmuutos b) taivutusmuodonmuutos c) vaakasauman leikkausliukuma d) ankkurointiliittimien ja pystysauman liitossiirtymästä aiheutuva kiertymä. (Luntta 2013)

Liitostekniikan lisäksi toinen tilaelementtikerrostalon jäykistyksen haaste on se, että seinien stabiloivat pystykuormat jäävät pieniksi. Tähän on kolme syytä:

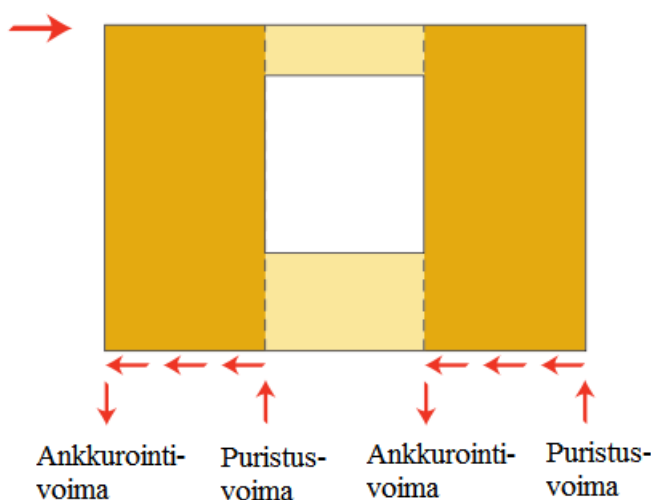
- 1) **Runkomateriaalin keveys.** Puun tilavuuspaino on vain noin viidennes betonin tilavuuspainosta.
- 2) **Lyhyet jännevälit.** Tilaelementin rajallisesta koosta johtuen välipohjien jännevälit ovat tyypillisesti neljän metrin luokkaa ja kantaville seinille tulevat pystykuormat ovat siten varsin pienet.
- 3) **Tuplaseinät.** Huoneistojen väliset seinät ovat kaksoisrakenteita, joissa kummallakin seinälle tulee vain puolikkaan jännevälän kuormat. Liitostekniikasta johtuen vain toisen seinän pystykuormat pystytään huomioimaan stabiloivana pystykuormana.

Jäykistäviksi seiniksi joudutaan käytännössä ottamaan myös tilaelementin ei-kantavia seinä, joiden pystykuormat ovat vielä pienemmät. Pystykuormien vähyydestä johtuen jäykistäville seinille tulee helposti nostetta, joka pitää pystyä ankkuroimaan perustuk-

siin. Jotta nosteet saataisiin pidettyä suhteellisen pieninä, tarvitaan pitkiä jäykistäviä seiniä tiheämmin kuin betonikerrostalossa. (Lepikonmäki 2014)

Aukotetut jäykistävät seinät voidaan mitoittaa joko yksinkertaistetulla tai tarkemmalla analyysillä. Yksinkertaistetussa analyysissä aukkojen ympärille jäävät umpinaiset täyskorkeat seinäosuudet toimivat erillisinä jäykisteinä. Aukkojen ylä- ja alapuolisten seinäosuuksien huomioiminen puolestaan vaatii tarkempaa analyysia ja tekee laskennasta monimutkaisempaa. Yksinkertaistetun menetelmän huono puoli on se, että nosteet muodostuvat helposti suuriksi ja useimmissa tapauksissa kukin jäykiste tulee ankkuroida erikseen. (Martinsons 2006; Vessby 2011) Ankkurointipisteiden määrän minimoiminen olisi kustannusten kannalta tärkeää, sillä nosteosat voivat olla työläitä asentaa. Kerrosten välisten teräsosien määrää tulisi minimoida myös akustisista syistä. (Martinsons 2006)

Välipohjalta siirtyvä vaakakuorma



Kuva 3.12. Voimien siirtyminen jäykistävälle seinille yksinkertaistetussa menetelmässä. (suomennettu lähteestä Martinsons 2006)

Jäykistävien seinien yksinkertaistettu analyysi on seinien vaakakuormakestävyyden kannalta varmallalla puolella, mutta saattaa antaa tuloksena liian suuria ankkurointi- ja puristusvoimia murtorajatilassa sekä liian suuria siirtymän arvoja käyttörajatilassa (Vessby 2011). Rakennesuunnittelijoiden haastatteluissa nousi esiin, että yksinkertaistetun analyysin käyttäminen olisi helpompaa, mutta aukkoja ympäröivät ehjät seinäosuudet jäävät usein lyhyiksi ja nosteet kasvavat sen myötä suuriksi. Myös käyttörajatilassa aukotetun seinän tarkempi analyysi voi olla tarpeen, sillä pitkistä seinistä saadaan siirtymän rajoittamisessa enemmän hyötyä kuin lyhyistä. (Hentinen 1.12.2016)

Mitä korkeampiin rakennuksiin mennään, sitä enemmän rakennuksen pohjamuodon merkitys korostuu jäykistysten suunnittelussa. Rakennuksen jäykkyyttä parantavat seuraavat jäykistysjärjestelmän geometriset ominaisuudet:

- 1) **Jäykistävien seinien symmetrinen asettelu.** Symmetrisessä rakennuksessa kuormat jakautuvat tasaisesti ja jäykistysjärjestelmän vääntökeskiö osuu lähelle tuulikuorman resultanttia, jolloin vääntöä syntyy hyvin vähän tai ei ollenkaan.
- 2) **Jäykistäviksi seiniksi tilaelementin pidemmän sivun seiniä.** Tilaelementin pidemmät sivut ovat kantavia, joten niille tulee enemmän pystykuormaa. Seinän pituus ja pystykuorma edesauttavat nosteiden rajoittamista.
- 3) **Jäykistävät seinät suunnilleen saman pituisia.** Kun jäykistävät seinät ovat yhtä pitkiä, kuormat jakautuvat niiden kesken tasaisemmin.
- 4) **Pitkiä jäykistäviä seiniä rakennuksen molemmissa pääsuunnissa.** Pitkillä seinillä edesautetaan riittävän jäykkyyden saavuttamista molemmissa pääsuunnissa.
- 5) **Jäykistäviä seiniä rakennuksen ulkokehällä.** Jäykistävien seinien sijoittaminen rakennuksen ulkokehälle parantaa rakennuksen vääntöjäykkyyttä ja vähentää väännöstä aiheutuvia lisärasituksia.
- 6) **Aukotuksen rajoittaminen jäykistävissä seinissä.** Jäykistäviksi seiniksi valitaan ensisijaisesti huoneistojen välisiä aukottomia seiniä, sillä seinän kestävyys on aukkojen kohdalla heikompi. (Lepikonmäki 2014)

Erityisesti seinien aukotuksen osalta rakenne- ja arkkitehtisuunnittelun yhteensovittaminen voi tuottaa ongelmia. Kohdeaineiston perusteella voidaan todeta, että CLT-tilaelementtikerrostalossa joudutaan käytännössä aina ottamaan ulkoseiniä jäykistäviksi seiniksi. Tämä johtaa joko työläisiin rakenneanalyysseihin tai aukotuksen rajoittamiseen, jolloin arkkitehtuurissa saatetaan joutua tinkimään asuntojen valoisuudesta. Ongelmia voi mahdollisesti aiheuttaa myös pohjamuodon epäsymmetrisyys tai riittämätön määrä pitkiä seiniä rakennuksen toisessa pääsuunnassa.

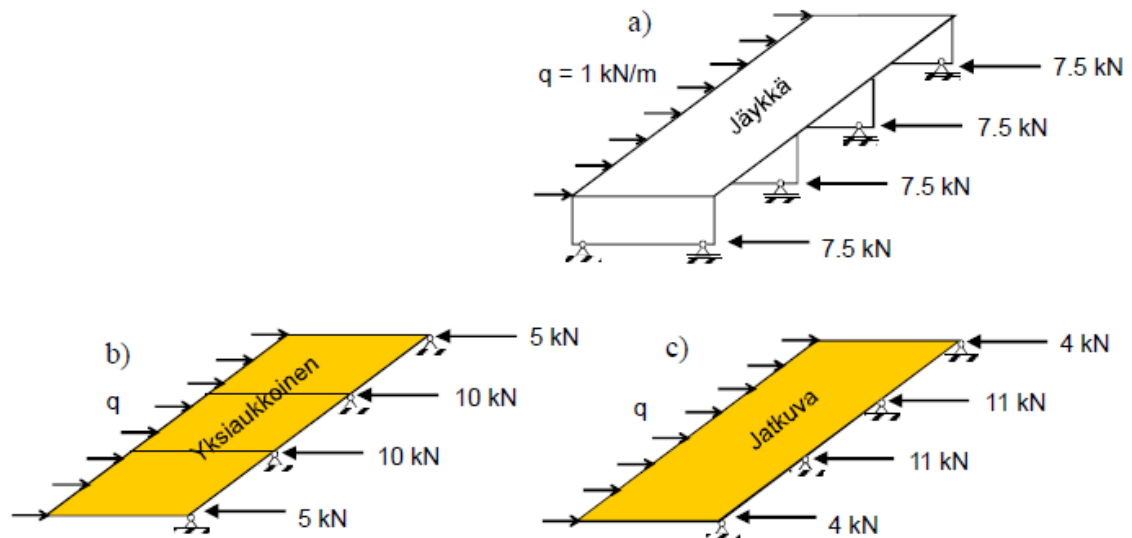
3.4.2 Välipohjataso jäykistys

Vaakakuormat siirretään pystyjäykisteille tilaelementtien kattolevyjen muodostaman tason avulla. Välipohjataso katkeaa asuntojen välillä, joten kattolevyt kiinnitetään toisiinsa esimerkiksi teräsosien avulla.

Vaakakuormien hallinta puurakenteisella välipohjalla poikkeaa betonirakenteisesta välipohjasta, sillä puulevyjä ei voi liittää betonielementtien tavoin monoliittisesti toisiinsa. Levyjä yhdistävissä liitososissa tapahtuu liitossiirtymiä ja liitososien jäykkyysominaisuuksilla on suuri vaikutus siihen, miten kuormat jakautuvat rakennuksen rungossa. Vaakakuormien rasittama CLT-taso toimii siis epäjatkovana ja joustavana rakenteena, eikä sitä voida olettaa jäykäksi. (Luntta 2013)

Kuvassa 3.13 on havainnollistettu, miten välipohjataso joustavuus ja jatkuvuus tukien kohdalla vaikuttavat kuormien jakautumiseen tuille. Vaihtoehdossa a) rakenne on täysin jäykkä, jolloin kuormat siirtyvät tuille niiden jäykkyyksien suhteessa. Vaihtoehdossa b) joustava levykenttä katkeaa tukien kohdalla ja kuormat jakautuvat yksiaukkoisen palkin

tavoin. Vaihtoehdossa c) joustava välipohjataso jatkuu yhtenäisenä tukien yli, jolloin kuormat jakautuvat moniaukkoisen palkin tavoin. Kuvasta nähdään, että levykentän jäykkyyden yliarviointi johtaa liian pieniin leikkausrasituksiin keskimmaisissa seinissä ja levykentän jäykkyyden aliarviointi johtaa puolestaan liian pieniin leikkausrasituksiin reunimmaisissa seinissä. Pystyjäykisteiden leikkausrasitusten aliarviointi saattaa puolestaan johtaa ankkurointiratkaisujen alimitoitukseen. (Luntta 2013)



Kuva 3.13. Kuormien jakautuminen tuille jäykässä ja joustavassa levykentässä, kun vertikaalijäykisteille on oletettu sama jäykkyys ja seinien välinen etäisyys 10 m. Kuvissa esitettyjen vaakarakenteiden toimintamallit ovat a) jäykkä, b) joustava ja tukien kohdalta epäjatkuva sekä c) joustava ja tukien kohdalta jatkuva. (Luntta 2013)

Rakennesuunnittelijoiden haastattelujen mukaan CLT-tilaelementtikerrostalon välipohjatason todellinen toiminta on yksiaukkoisen rakenteen ja jäykän tason välimaastossa. Varmalla puolella oleva tapa voisi olla laskea seinille ja perustuksille tulevat rasitukset sekä yksiaukkoisen että jäykän rakenteen mukaan ja valita näistä suurimmat rasitukset. (Lepikonmäki 30.11.2016; Hentinen 1.12.2016)

Asuinrakennuksen jäykistysjärjestelmä on harvoin symmetrinen ainakaan molemmissa rakennuksen pääsuunnissa. Epäsymmetriaa muodostuu joko jäykistävien rakenteiden epäsymmetrisestä sijoittelusta tai niiden erilaisista jäykkyyksistä suhteessa toisiinsa. Epäsymmetrisessä jäykistysjärjestelmässä vaakakuormien resultantti ja tason kiertokeskiö eivät kohtaa toisiaan, jolloin kuorman epäkeskeisyys aiheuttaa rakennusrungon kiertymistä kiertokeskiön ympäri. Välipohjan joustavuus vähentää rakennusrungon kiertojäykkyyttä, sillä joustava levykenttä ei sido pystyjäykisteitä yhdessä toimivaksi kokonaisuudeksi samalla tavalla kuin jäykästi toimiva taso. Puutteellinen kiertojäykkyys altistaa rakennusrungon vääntöväärähtelylle. (Luntta 2013)

3.5 Tilaelementtirungon toiminta käyttörajatilassa

On havaittu, että käyttörajatilamitoituksella on huomattava merkitys korkeiden puukerrostalojen suunnittelussa. Puurakenteissa voi tapahtua suuria muodonmuutoksia ennen kuin murtorajatila saavutetaan. Muodonmuutokset voivat häiritä asumismukavuutta rakenteista tulevien äänien ja värähtelyjen kautta. (Vessby 2011) Värähtelyn lisäksi CLT-tilaelementtikerrostalon suunnittelussa on kiinnitettävä huomiota rakennuksen vaakasiirtymään sekä rakenteen painumiseen pystysuunnassa.

Rakennesuunnittelijoiden haastattelujen mukaan puukerrostaloissa rungon toiminta käyttörajatilassa tulee merkittäväksi matalammilla rakennuskorkeuksilla kuin tavanomaisessa betonirakentamisessa. Tämä johtuu mm. rakenteiden pienemmästä massasta ja liitosten pienemmästä jäykkyydestä. (Lepikonmäki 22.9.2016) Kuten luvussa 3.4 todettiin, liitosten pienempään jäykkyyteen johtavat erityisesti äänitekniset ratkaisut. Rakenteet katkeavat huoneistojen välillä, liitokset ovat joustavia ja väleissä käytetään ääntä vaimentavia joustavia kerroksia.

Tässä alaluvussa käsitellään CLT-tilaelementtirungon vaakasiirtymää, pystysuuntaista painumaa ja tuulen aiheuttamaa värähtelyä sekä näiden hyväksyttävyyden arvioimiseen käytettäviä kriteerejä. Korkeiden puukerrostalojen käyttörajatilamitoituksen ongelmana on se, että virallisia ja yhtenäisiä suunnittelukriteerejä ei ole. Siksi joudutaan käyttämään tapauskohtaista harkintaa ja tulokset saattavat vaihdella hyvin paljon eri suunnittelijoiden välillä.

3.5.1 Rakennusrungon vaakasiirtymä

Suomen olosuhteissa rakennuksen vaakasiirtymän pääasiallinen aiheuttaja on tuulikuormitus. Rakennusrungon vaakasiirtymän rajoittamisen syynä on yleensä julkisivun, väliseinien ja muiden kantamattomien rakenteiden ja järjestelmien halkeilun tai vaurioitumisen estäminen. Taipumat voivat aiheuttaa myös tiiviyn peltämistä rakenteissa. Suuret taipumat lisäävät myös toisen kertaluvun vaikutuksia rungon rasituksissa. (Kortelainen 2012)

Puukerrostalo altistuu betonirakennusta herkemmin tuulen aiheuttamalle vaakasiirtymälle rakenteen keveyden ja pienemmän jäykkyyden vuoksi. Puukerrostaloissa kerrosten välillä käytettävien ääneneristyskumien on havaittu vaikuttavan huomattavasti vaakasiirtymän suuruuteen. Näslund ja Johnsson (2014) ovat saaneet tutkimuksessaan tulokseksi, että rankarakenteisessa puukerrostalossa vaakasiirtymä voi pudota jopa kolmasosaan, kun ääneneristyskumit poistetaan rakennemallista.

Rakennusrungon suurin tuulen suuntainen vaakasiirtymä lasketaan ekvivalentin staattisen tuulikuorman perusteella (EN 1991-1-4 (2011), liite B). Voimassa oleva puurakenteiden suunnittelua koskeva Eurokoodi EN 1995-1-1 (2014) ei anna raja-arvoa raken-

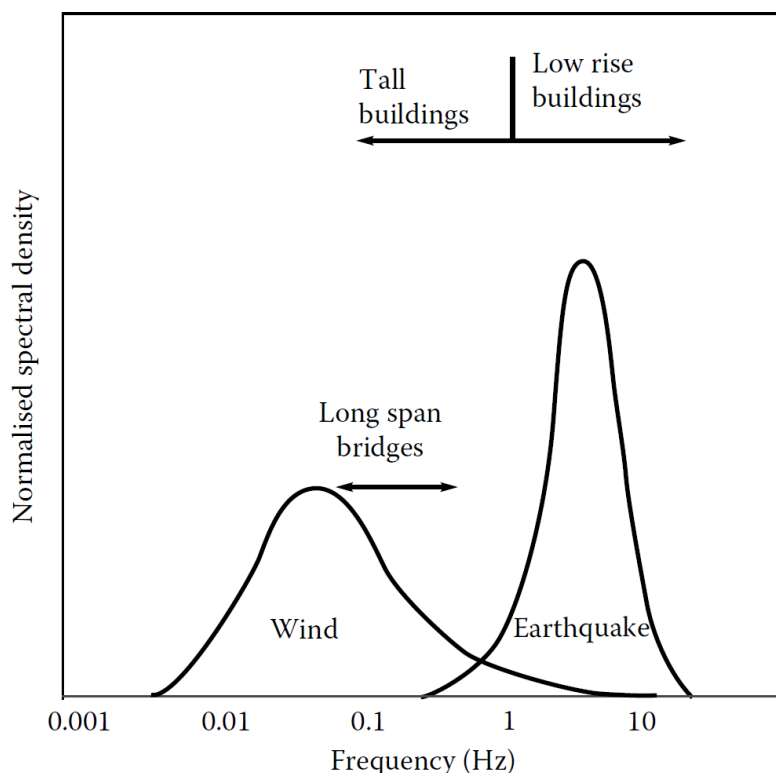
nuksen vaakasiirtymälle. Teräsrakenteiden suunnittelua koskevan Eurokoodin EN 1993-1-1 kansallinen liite antaa rakennuksen vaakasiirtymän rajaksi $H/400$, missä H on rakennuksen korkeus (Ympäristöministeriö 2007b). Korkeille betonielementtirakennuksille yleisesti käytetyt rajat ovat $H/400 - H/700$ (BES 2010). Puurakenteiden suunnitteluohje RIL 205-1-2009 (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 2009a) antaa puurakennuksen vaakasiirtymän rajaksi $H/300$, mutta rakennesuunnittelijoiden haastattelujen mukaan tämä raja johtaa kuitenkin korkeilla rakennuksilla liian suuriin vaakasiirtymiin (Lehtimäki 22.9.2016). CLT-kerrostalolle sopivammaksi siirtymärajaksi onkin esitetty arvoa $H/500$ (ProHolz 2014). Koska yksiselitteistä raja-arvoa puukerrostalon vaakasiirtymälle ei ole annettu, se määritellään projektikohtaisesti.

Vaakasiirtymän suuruutta voidaan rajoittaa lisäämällä rakenteen jäykkyyttä. Kokemusten mukaan liitosten suunnittelulla pystytään merkittävästi vaikuttamaan rakennuksen jäykkyyteen. Myös rakennuksen pohjamuoto vaikuttaa olennaisesti siihen, kuinka helposti jäykistysratkaisut pystytään toteuttamaan. Vaakasiirtymän rajoittaminen on helpompaa, kun jäykistäviä seiniä on riittävästi rakennuksen molemmissa pääsuunnissa ja niiden sijoittelu ei aiheuta vääntöä ja suuria kuormituksia välipohjarakenteelle. (Lepikonmäki 21.9.2016)

3.5.2 Tuulen aiheuttama värähtely

Tuulen turbulenttisuus sekä pyörteiden irtoaminen rakenteen sivuilta aiheuttavat rakennukseen dynaamisen kuormituksen, jonka voimakkuus riippuu ajasta ja rakenteen kohdasta ja saa rakenteen värähtelemään. Korkeissa rakennuksissa rakenteen vaste tuulikuormitukseen olisi syytä huomioida esimerkiksi asumismukavuuden, taipumien, rakenteiden jännitysten ja mahdollisen väsymisen tarkastelussa. (Kortelainen 2012) Rakennusrunko värähtelee herkimmin silloin, kun sen alin ominaistajuus sijoittuu tuulen taajuusjakauman alueelle (Vessby 2011).

Kuvassa 3.14 on havainnollistettu tuulen ja maanjäristyksen aiheuttamia taajuusjakaumia sekä rakennusrungon alimman ominaistajuuden tyypillistä sijoittumisaluetta. Tavanomaisessa matalassa rakentamisessa tuulen dynaamiset vaikutukset eivät aiheuta ongelmia, sillä rakennusrungon alin ominaistajuus asettuu yleensä tuulen taajuusjakauman yläpuolelle. Tällaisissa tapauksissa riittää tuulikuorman tarkastelu pelkästään staattisena kuormana. Sen sijaan korkeassa rakentamisessa alin ominaistajuus on matalampi, jolloin tuuli voi aiheuttaa rakennusrungon havaittavaa värähtelyä. (Vessby 2011) Korkean rakennuksen huojuminen voi tulla ihmisaistein havaittavaksi jo kohtalaisissa tuuliolosuhteissa, vaikka rakenteiden kestävyys sallisi paljon suuremmankin tuulikuormituksen (Kortelainen 2012). Korkean rakennuksen jäykistysjärjestelmä joudutaankin siis monesti mitoittamaan käyttörajoituksen perusteella.



Kuva 3.14. Tuulen ja maanjäristyksen aiheuttama dynaaminen heräte ja rakennuksen alimman ominaistajuuden tyypillinen sijoittumisalue. (Holmes 2015)

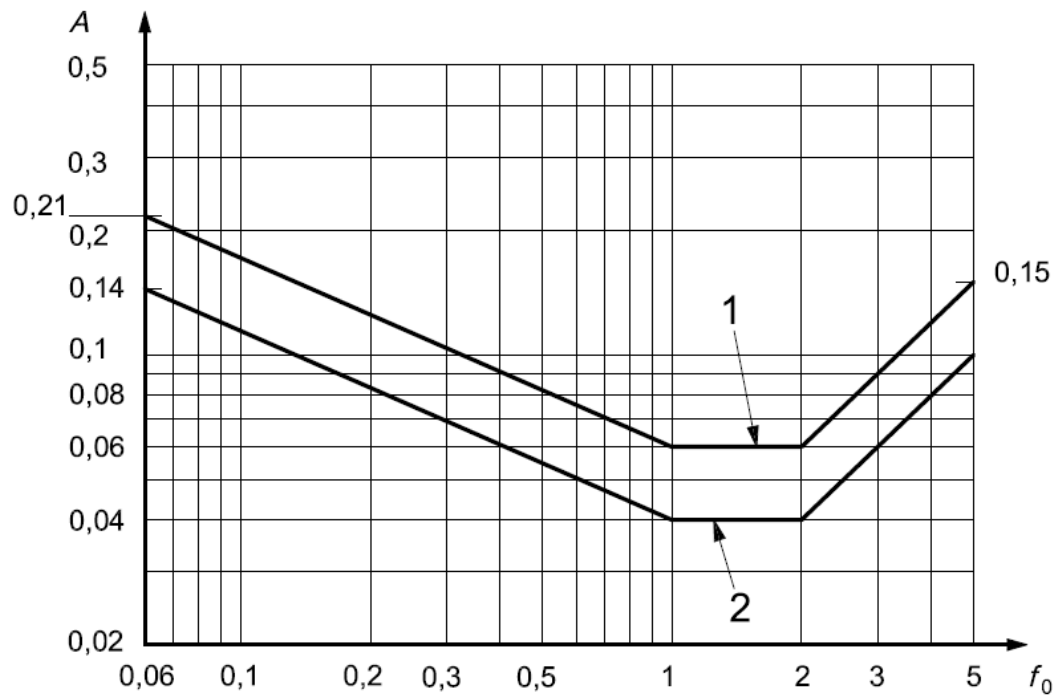
Rakennusrungon dynaaminen vaste tuulikuormaan on siis erityisesti korkeaan rakentamiseen liittyvä haaste. Puukerrostaloilla dynaamiset vaikutukset tulevat kuitenkin esiin jo olennaisesti matalammilla rakennuskorkeuksilla kuin betoni- ja teräsrakenteisilla kerrostaloilla. Tämä johtuu rakenteiden pienemmästä jäykkyydestä. Kirjallisuudessa on esitetty erilaisia arvoja sille, minkä ominaistajuuden alittavat rakennusrungot katsotaan dynaamisesti kuormitetuiksi rakenteiksi ja vaativat siten tarkastelua myös tältä osin. Raja-arvoksi on esitetty mm. 1 Hz (Holmes 2015) tai 3 Hz (Boverket 1997). Rakennesuunnittelijoiden haastattelujen mukaan CLT-tilaelementtikerrostaloilla rakennusrungon laskennallisen ominaistajuuden suuruusluokka on tyypillisesti 0,8 – 1,5 Hz. Käytännön suunnittelutyössä on havaittu, että laskelmien mukaan rakennusrungon värähtely voi aiheuttaa ongelmia jo 5-kerroksisissa tilaelementtikerrostaloissa, mikäli jäykistystä ei ole huomioitu riittävästi rakennuksen pohjamuodossa. (Lepikonmäki 21.9.2016)

Tuulikuorma altistaa rakennuksen kolmelle erilaiselle värähtelylle: tuulensuuntaiselle taivutusvärähtelylle, poikkisuuntaiselle taivutusvärähtelylle sekä kiertymä- eli vääntövärähtelylle. Tuulikuormaa käsittelevä Eurokoodi EN 1991-1-4 (2011) antaa ohjeita tuulen suuntaisen taivutusvärähtelyyn. Sen sijaan poikkisuuntaisen värähtelyn ja vääntövärähtelyn arvioimiseen Eurokoodi ei anna ohjeita. Näiden ilmiöiden analyttinen tarkastelu on erittäin vaikeaa tuulen monimutkaisen ja satunnaisten käyttäytymisen vuoksi. Poikkisuuntaisen värähtelyn ja vääntövärähtelyn arvioimiseen on kuitenkin kehitetty joitakin tuulitunnelitestauksiin perustuvia osittain empiirisiä kaavoja. (Virtanen 2015)

Kun määritetään rakennuksen värähtelyominaisuuksia, tarvitaan lähtötietoina dimensioiden lisäksi rakennuksen massa kerroksittain, hitausmomentti, jäykkyyskeskiö, jäykkyys molemmissa pääsuunnissa sekä kiertymisjäykkyys. Näiden avulla voidaan laskea rakennuksen ominaistaajuudet ja ominaismuodot vääntövärähtelyssä sekä molempien pääsuuntien taivutusvärähtelyssä. (Kortelainen 2012) Rakennuksen dynaamiset ominaisuudet voidaan määrittellä karkeasti yksinkertaistetuilla kaavoilla, mutta suositeltavampaa on määrittää rakennuksen ominaistaajuudet tarkemmin elementtimenetelmällä (Virtanen 2015).

Värähtelyn havaitseminen ja häiritsevyys vaihtelee henkilöstä riippuen ja siksi sen objektiivinen arvioiminen on vaikeaa. Suunnitteluohjeissa hyväksyttävän värähtelyn mittarina käytetään yleensä sen aiheuttamaa kiihtyvyyttä. (Vessby 2011) Kiihtyvyyden lisäksi aistimuksen voimakkuuteen vaikuttaa myös liikkeen taajuus. Värähtelyn häiritsevyyttä voimistavat myös muut rakennuksen liikkeestä johtuvat aistimukset, kuten tavaroiden liikkeet, rakenteista kuuluvat äänet tai tuulen aiheuttamat äänet julkisivuissa. (Kortelainen 2012) Värähtelyn hyväksyttävyyden arvioimisen ongelmana on kuitenkin se, että yhtenäisiä suunnittelukriteerejä ei ole (Talja & Fülöp 2016).

Eurokoodi EN 1991-1-4 (2011) esittelee liitteessä B menetelmän tuulen aiheuttaman maksimikiihtyvyyden laskemiseksi tuulen suuntaisessa taivutusvärähtelyssä. Eurokoodi ei kuitenkaan anna kiihtyvyyksrajoja, joilla vaakasuuntaisen värähtelyn hyväksyttävyyttä voitaisiin arvioida. Arviointikäyrä (kuva 3.15) löytyy mm. standardista ISO 10137 (2007). Käyrän muuttujina ovat vaakasuuntainen huippukiihtyvyys ja rakennuksen alin ominaistaajuus. Käyrä nro 1 kuvaa toimistorakennuksessa hyväksyttäviä raja-arvoja ja käyrä nro 2 asuinrakennuksessa hyväksyttäviä raja-arvoja. Asuinrakennuksen raja-arvo on lähellä tasoa, jossa ihminen havaitsee liikkeen 90 %:n todennäköisyydellä. Käyrä on johdettu todellisista rakennuskohteista kerätyn tutkimustiedon pohjalta. (ISO 10137)



A Huippukiihtyvyys [m/s^2]

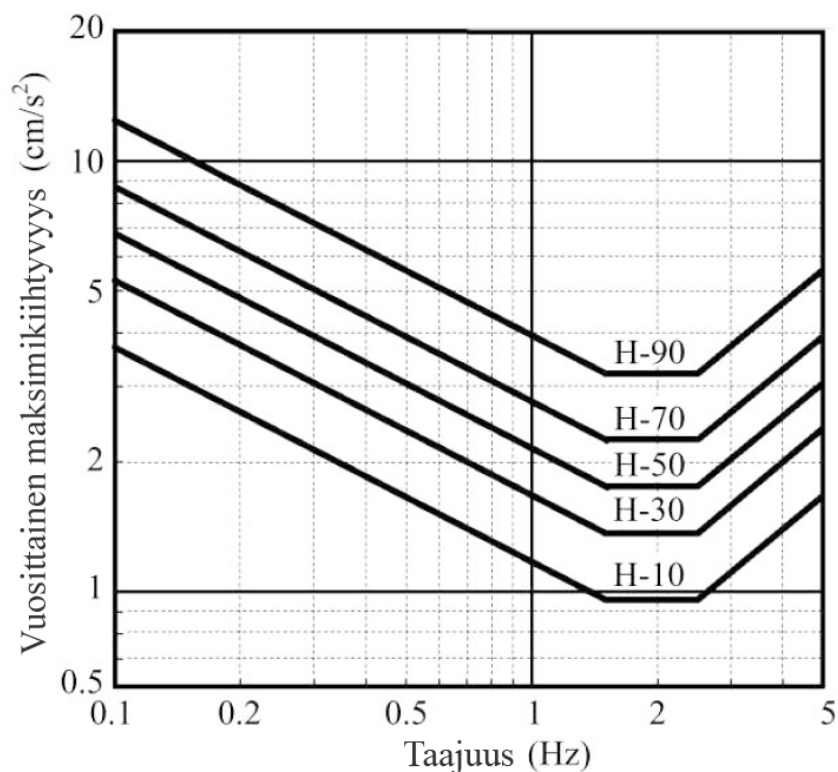
f_0 Alin ominaistaaajuus rakennuksen pääsuunnissa ja kiertymässä [Hz]

1 Toimistot

2 Asuinrakennukset

Kuva 3.15. Käyrä tuulen aiheuttaman värähtelyn hyväksyttävyyden arvioimiseksi vaakasuunnassa yhden vuoden toteutusjaksona. (ISO 10137)

Architectural Institute of Japan (AIJ) esittää ohjeistuksessaan kuvaajan, josta voidaan arvioida kiihtyvyyden havaitsemistodennäköisyyttä eri taajuuksilla. Hyväksyttävä taso jätetään kuitenkin kohdekohtaisesti määriteltäväksi. (Tamura 2007) Värähtelyä voidaan myös rajoittaa asettamalla taajuudesta riippumaton raja-arvo kiihtyvyyden suuruudelle. Raja-arvo ilmoitetaan useimmiten prosentteina maan vetovoimakiihtyvyydestä. Esimerkiksi Taranath (2010, s. 315) esittää sopivaksi kiihtyvyyksrajaksi 1-3 % maan vetovoimakiihtyvyydestä, alempien arvojen sopiessa asuinrakennuksille ja korkeampien toimistorakennuksille.



Kuva 3.16. Kiihtyvyyksien havaitsemistodennäköisyys eri taajuuksilla. *H*-luku ilmaisee sen, kuinka monta prosenttia ihmisistä havaitsee kyseisen kiihtyvyyden. (suomennettu lähteestä Tamura 2007, alkuperäinen lähde AIJ Guidelines 2004)

Yksi rakennuksen dynaamiseen vasteeseen vaikuttava tekijä on vaimennussuhde. Rakennuksen kokonaisvaimennus muodostuu sisäisestä vaimennuksesta, aerodynaamisesta vaimennuksesta sekä erityislaitteista aiheutuvasta vaimennuksesta, mikäli sellaisia on käytetty. (EN 1991-1-4) Rakennuksen sisäisen vaimennussuhteen määrittämiseen ei ole kuitenkaan olemassa teoreettista menetelmää, joten se on arvioitava mittaustuloksista kootun tietokannan perusteella. Tällaisia tietokantoja on koottu mm. betoni- ja teräsrakennuksista. (Tamura 2007)

Eurokoodi EN 1991-1-4 (2011) antaa liitteessä F likimääräisiä sisäisen vaimennuksen logaritmisen dekrementin arvoja erilaisille rakennustyypeille. Puukerrostaloille ohjearvoja ei kuitenkaan määritellä, sillä tutkimustietoa aiheesta ei ole vielä riittävästi. Talja & Fülöp (2016) ehdottavat kansainvälisen kirjallisuuden pohjalta CLT-tilaelementtikerrostalon kokonaisvaimennussuhteeksi 1,2 - 3,6 %. Tästä saadaan 2π :llä kertomalla logaritmisen dekrementin likimääräiseksi vaihteluväliksi 0,075 - 0,226. Jotta tyyppillisen suomalaisen CLT-tilaelementtikerrostalon vaimennusta pystyttäisiin arvioimaan tarkemmin, tarvittaisiin tutkimus- ja mittaustuloksia tästä rakennustyyppistä (Talja & Fülöp 2016).

3.5.3 Rakennusrungon painuma

Yksi CLT-tilaelementtikerrostalon suunnittelussa huomioitava erityispiirre on rakenteen painuminen. Painuminen aiheutuu käytännössä kolmesta osatekijästä:

- 1) Puun kosteusmuodonmuutokset
- 2) Puun ja ääneneristyskumin kimmoisen kokoonpuristuminen
- 3) Puun ja ääneneristyskumin viruminen. (Stora Enso 2016a)

Puun muodonmuutokset ovat suurempia syytä vastaan kohtisuorassa suunnassa kuin syyn suunnassa. Tämä koskee sekä kosteusmuodonmuutosta että kuormituksen aiheuttamaa muodonmuutosta. Rakennuksen kokonaispainuman suuruus riippuu rakenteen ominaisuuksista, rakennuksen korkeudesta, kuormituksesta, puutavaran ominaisuuksista sekä puun kosteuspitoisuudesta rakennusaikana ja käytön aikana. Tyypillisen 5-kerroksisen CLT-tilaelementtikerrostalon painuman suuruusluokka on 5 mm kerrosta kohti. (Stora Enso 2016a)

Puulla on taipumus asettua tasapainokosteuteen ympäristönsä kanssa, jolloin puu turpoaa tai kutistuu kosteusvaihteluiden seurauksena. Siksi on tärkeää, että puun kosteuspitoisuus pysyy kuljetuksen, varastoinnin ja asennuksen aikana lähellä käyttökohteen lopullisia kosteusolosuhteita. Puun kosteuspitoisuus ilmoitetaan puussa olevan veden painon ja puun absoluuttisen kuivapainon suhteena. (RT 21-10978) CLT-levyn kosteuspitoisuus on tehtaalta lähtiessä valmistajasta riippuen 6-15% (ETA-14/0349; VTT Expert Services Oy 2015; ETA-06/0138). Yhden prosentin muutos puun kosteuspitoisuudessa aiheuttaa noin 0,25 % pituudenmuutoksen syytä vastaan kohtisuorassa eli levyn paksuussuunnassa. Levyn pituussuunnassa osa kerroksista on puolestaan syytä vastaan kohtisuorassa ja osa syyn suuntaisesti. Levyn pituussuunnassa kosteusmuodonmuutoksen suuruuden määräävät ne lautakerrokset, joiden syysuunta on sama kuin tarkasteltavan muodonmuutoksen suunta. Syysuunnassa kosteusmuodonmuutos on noin 0,02 %:n pituudenmuutos yhden prosentin kosteuspitoisuuden muutosta kohti. (RT 21-10978)

Kosteusmuodonmuutoksen tavoin myös CLT:n kimmoisen kokoonpuristumisen suuruus riippuu syysuunnasta. Kimmoisen kokoonpuristuminen on prosentuaalisesti suurempi, kun levyä kuormitetaan sen paksuussuunnassa, jolloin kaikki lautakerrokset kuormittuvat syytä vastaan kohtisuorassa suunnassa. CLT-levyn lamellien kimmokerroin on syysuunnassa 11500 - 12500 MPa (ETA-14/0349; ETA-06/0138; VTT Expert Services Oy 2015), mutta syytä vastaan kohtisuorassa suunnassa vain 370 MPa, kun levyssä käytetyn sahatavaran lujuusluokka on C24. Pitkäkestoisessa kuormituksessa muodonmuutoksen suuruutta lisää vielä puun viruminen. (Stora Enso 2016a)

Puun kimmoisen kokoonpuristuminen ja viruminen ovat merkitykseltään vähäisiä verrattuna kosteusliikkeiden aiheuttamiin muodonmuutoksiin. Sen sijaan kerrosten välissä käytettävien ääneneristyskumien kimmoisen kokoonpuristuminen ja viruminen lisäävät

olennaisesti rakennuksen kokonaispainumaa. (Stora Enso 2016) Ääneneristyskumeja on kovuudeltaan erilaisia. Käytännön suunnittelutyössä ääneneristyskumin joustavuus valitaan pystykuorman suuruuden mukaan siten, että elastomeeri toimii ääniteknisesti oikealla alueella ja kestää sille tulevat kuormat (Lepikonmäki 21.9.2016). Ääneneristyskumin tulee joustaa, mutta se ei saa kuitenkaan painua kokonaan kasaan kuorman alla. Oikein valitun ääneneristyskumin kokoonpuristuma on viruma huomioon ottaen noin 10-15 % kumin paksuudesta (Stora Enso 2016a).

CLT-rungon painuminen on huomioitava erityisesti liitosten suunnittelussa. Pystysuuntaisten teräsosien on sallittava muodonmuutosten aiheuttamat puurakenteen liikkeet. Erityisen haastavaa tämä on rakenteen ankkuroinnin kannalta, sillä nostetta ottavien teräsosien pitäisi samanaikaisesti sekä sallia että estää rakenteen pystysuuntainen liike. Painuminen aiheuttaa nosteosien löystymistä ja siksi niitä olisi hyvä pystyä kiristämään jälkikäteen, mutta usein jälkikiristysmahdollisuuden toteuttaminen on rakennusteknisesti vaikeaa (Martinsons 2006). Rakenteen painuminen vaikuttaa myös talotekniikkasuunnitteluun, sillä pystysuuntaisten putkien on pystyttävä mukautumaan rakenteen painumiseen, jotta putkien rikkoutumiselta vältyttäisiin. (Stora Enso 2016a) Painuminen voi myös vaikuttaa julkisivujen suunnitteluun ainakin pystypaneelilla, joiden tulee pystyä tasaamaan mahdollinen painumaero (Lepikonmäki 21.9.2016).

Tasainen painuma ei yleensä aiheuta vakavia haittoja. Se on kuitenkin huomioitava silloin, kun puurakenne liitetään painumattomiin rakenteisiin, kuten esimerkiksi betonirakenteeseen hissikuiluun. Sen sijaan epätasainen painuma on huomattavasti haitallisempaa kuin tasainen painuma, sillä se on vaikeammin hallittavissa ja voi aiheuttaa esimerkiksi lattioiden kaltevuutta tai pakkovoimien myötä vaurioita rakenteiden tiiviydessä. (Tojkander 2011) Erilaisten rakenneratkaisujen sekakäyttö aiheuttaa olennaisia riskejä epätasaiseen painumaan sekä toleranssien että rakenteiden erilaisen muodonmuutuskäyttäytymisen vuoksi (Lepikonmäki 21.9.2016).

3.6 Rakentamisprosessin huomioiminen suunnittelussa

Tilaelementtitekniikka asettaa suunnittelulle uudenlaiset lähtökohdat, joissa tulee huomioida teollisen tuotantotavan vaatimukset. Valmistajasta riippumattomia enimmäismittoja tilaelementille ei voida antaa, sillä tilaelementin maksimikokoon vaikuttavat monet tekijät. Näitä ovat tilaelementin maksimipaino, kuljetettavuus (yleensä maanteitse) sekä tehtaiden tuotantoprosesseihin liittyvät rajoitteet. Myös käytettävien CLT-levyjen valmistusmitat voivat ohjata sitä, millaiset mitat rungolle valitaan.

Tilaelementtirakentamisen erityispiirre on myös se, että suunnitelmilta vaaditaan tavanomaista suurempaa tarkkuustasoa. Suunnittelu ja toteutus on tehtävä niin tarkasti, että työmaalla komponentit sopivat suoraan toisiinsa. Kustannustehokkaan asennustyön kannalta olennaista on, että mahdollisimman suuri osa työvaiheista saadaan tehtyä tehtaalla ja paikalla rakentamisen osuus on pieni. Myös tilaelementtien asennusjärjestys on

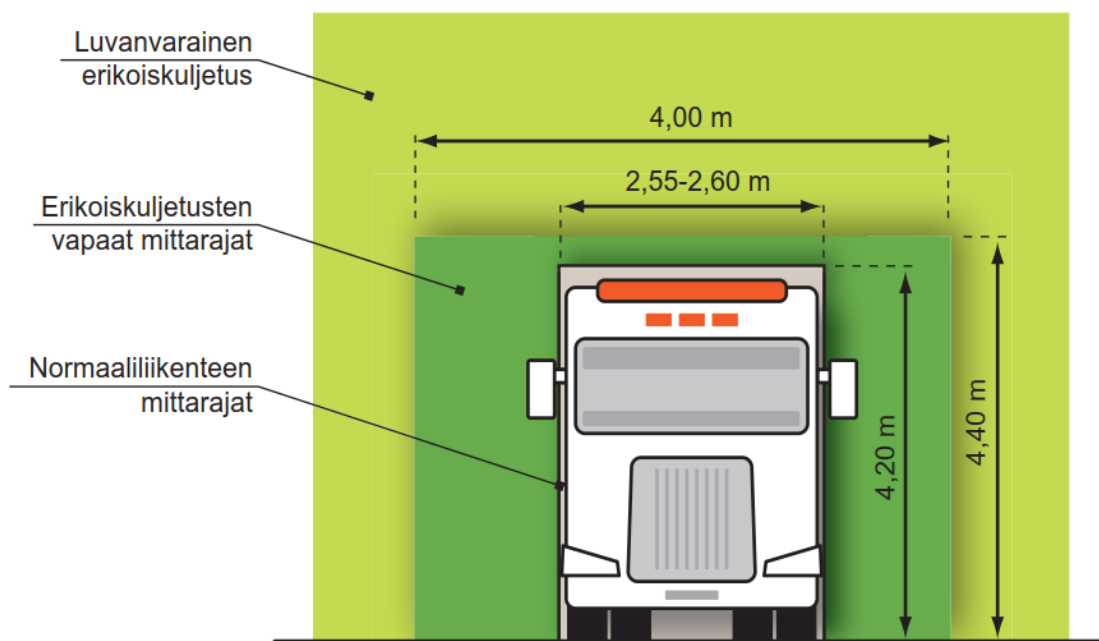
huomioitava suunnittelussa, sillä asennusjärjestys vaikuttaa siihen, mitkä osat voivat olla tilaelementeissä valmiiksi ja miten liitososat mahdollista kiinnittämään.

3.6.1 Tilaelementin kuljetus

Tilaelementtirakentamisessa elementtien koko on suurempi kuin tavanomaisessa seinä- ja laattaelementteihin perustuvassa elementtirakentamisessa. Kuljetettavuus ja käsiteltävyys asettavat rajoitteita sille, kuinka suuria tilaelementit voivat olla. Myös haastatte- luissa tuli selvästi ilmi se, että kuljetettavuus on keskeinen suunnitteluratkaisu määrit- tävä tekijä. Rakennuksen toteutustapaa valittaessa on selvitetävä, onko kuljetusreitillä esteitä, ovatko erikoiskuljetukset sallittuja ja onko kuljetusajankohdille rajoitteita. Tila- elementin mitat tulee suunnitella sellaisiksi, että kuljetusten toteuttaminen on taloudel- lista. (Liimatainen 12.8.2016)

Maantiekuljetukset jaetaan normaaliliikenteeseen ja erikoiskuljetuksiin. Kuljetuksia on kolmen tyyppisiä:

- 1) normaaliliikenne
- 2) erikoiskuljetus, joka ei ylitä vapaita mittarajoja sekä
- 3) erikoiskuljetus, joka ylittää vapaat mittarajat ja tarvitsee siten erikoiskuljetuslu- van. (ELY-keskus 2010)



Kuva 3.17. Normaaliliikenteen mittarajat ja erikoiskuljetusten vapaat mittarajat kulje- tuksen leveydelle ja korkeudelle. (ELY-keskus 2010)

Normaaliliikenteen mittarajat sekä erikoiskuljetuksen vapaat mittarajat kuljetuksen leveydelle ja korkeudelle on esitetty kuvassa 3.17. Erikoiskuljetukset eroavat normaalikuljetuksista siten, että niissä on varmistettava, ettei kuljetusreitillä ei ole sellaisia tien yläpuolisia rakenteita, joihin kuljetus saattaisi osua (RT 98-11213). Erikoiskuljetuksissa tulee myös noudattaa erikoiskuljetuksen merkitsemisestä ja varoitustoimenpiteistä annettuja määräyksiä. Lisäksi luvanvaraisissa erikoiskuljetuksissa tulee hakea erikoiskuljetuslupaa. (ELY-keskus 2010)

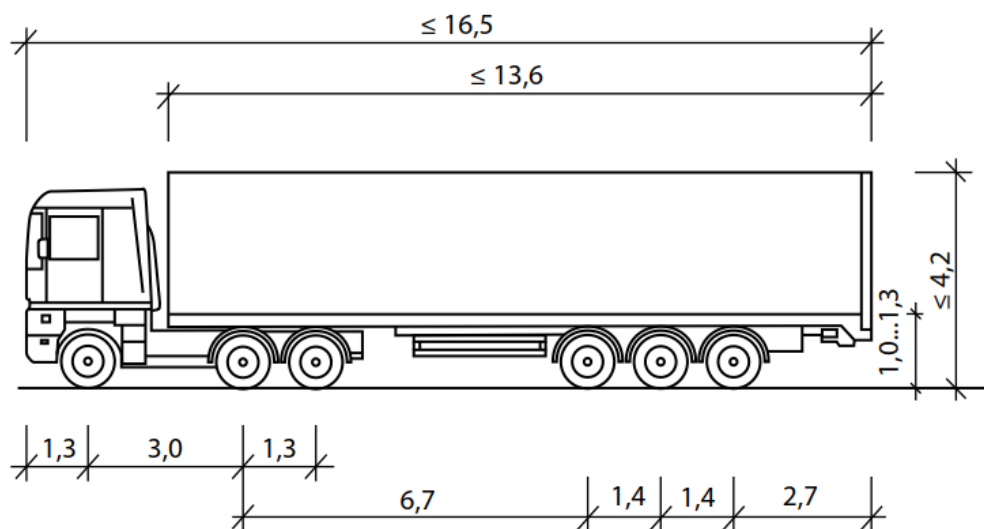
Tilaelementtien kuljetukset ovat erikoiskuljetuksia, sillä tilaelementin leveys ylittää käytännössä aina normaalikuljetuksen mittarajan. Kuljetuksessa vaadittavat varoitustoimenpiteet riippuvat kuljetuksen pituudesta, leveydestä ja korkeudesta. Tilaelementtien tapauksessa korkeus ja pituus jäävät yleensä niin pieniksi, etteivät ne edellytä varoitustoimenpiteitä, joten varoitustoimenpiteet määräytyvät aina tilaelementin leveyden mukaan. Vaadittavat varoitustoimenpiteet on koottu tilaelementin leveyden mukaan taulukkoon 3.3.

Taulukko 3.3. Tilaelementin kuljetuksessa noudatettavat varoitustoimenpiteet. (koottu lähteestä Liikenne- ja viestintäministeriö 2012)

Tilaelementin leveys	Varoitusautoja edessä	Varoitusautoja takana	Liikenteen ohjaajia
≤ 3,5 m	0	0	0
≤ 4,0 m	1	0	0
≤ 5,0 m *	1	1	2
≤ 7,0 m *	2	1	3

* Vaatii erikoiskuljetuslupan

Tilaelementin kuljetuksen luvanvaraisuus määräytyy tilaelementin leveyden ja joskus myös korkeuden perusteella. Erikoiskuljetus muuttuu luvanvaraiseksi, mikäli tilaelementin leveys on yli 4 metriä tai kuljetuksen kokonaiskorkeus yli 4,4 metriä (ELY-keskus 2010). Kuljetuksen kokonaiskorkeuteen vaikuttaa tilaelementin korkeuden lisäksi kuormauskorkeus. Tavanomaisen kuorma-auton kuormauskorkeus on yleensä 1 - 1,3 metriä, mitä on havainnollistettu kuvassa 3.18 (RT 98-11213). Tilaelementin korkeus voi olla valmistajasta riippuen noin 3 - 3,4 metriä, joten kuljetuksen kokonaiskorkeus saattaa joissakin tapauksissa ylittää luvanvaraisen erikoiskuljetuksen mittarajan. Korkeuden ei kuitenkaan pitäisi tulla rajoitteeksi, mikäli käytetään lavettikuljetusta.



Kuva 3.18. Kuorma-auton ja puoliperävaunun yhdistelmän mittoja. (RT 98-11213)

Kuljetuksen asettama raja tilaelementin pituudelle riippuu käytettävästä ajoneuvosta. CLT-tilaelementtien kuljetuksia on tehty mm. kuorma-auton ja perävaunun yhdistelmällä (Tilaelementtitehtaan 1 edustaja 9.12.2016). Perävaunun maksimipituus on 13,6 metriä (RT 98-11213). Erikoiskuljetuksiin tarkoitetuilla ajoneuvoilla voidaan kuitenkin päästä hyvinkin suuriin pituusmittoihin. Tilaelementin maksimipituus riippuu siitä, mikä kuljetustapa katsotaan kustannusten kannalta järkeväksi. Yleensä jokainen tilaelementti vaatii oman kuljetuksensa.



Kuva 3.19. Pakattu tilaelementti lähdössä kohti työmaata. (Kuva: Elementti-Sampo)

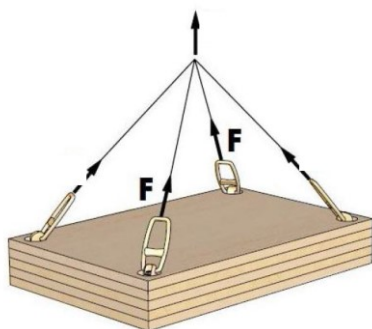
Kuljetuksen asettamien reunaehtojen lisäksi tehdasympäristön fyysiset ominaisuudet voivat asettaa ehtoja sille, kuinka suuria tilaelementeistä voidaan tehdä. Tilaelementtitehtaan edustajan haastattelun mukaan esimerkiksi elementtien kasausrinjojen leveydet asettavat rajoitteita tilaelementtien maksimimitoille (Tilaelementtitehtaan 1 edustaja 9.12.2016). Koska tilaelementtien maksimimitat riippuvat hyvin paljon valmistajasta, on alla olevaan taulukkoon 3.3 koottu muutaman tilaelementtivalmistajan ilmoittamat maksimimitat tilaelementeille.

Taulukko 3.3. Valmistajien ilmoittamia maksimittoja CLT-tilaelementeille.

Valmistaja	Pituus	Leveys	Korkeus	Paino
Elementti Sampo Oy	12 m	5,5 m	3,2 m	16 tn
Pyhännän Rakennustuote Oy	12 m	5,2 m	3,3 m	20 tn

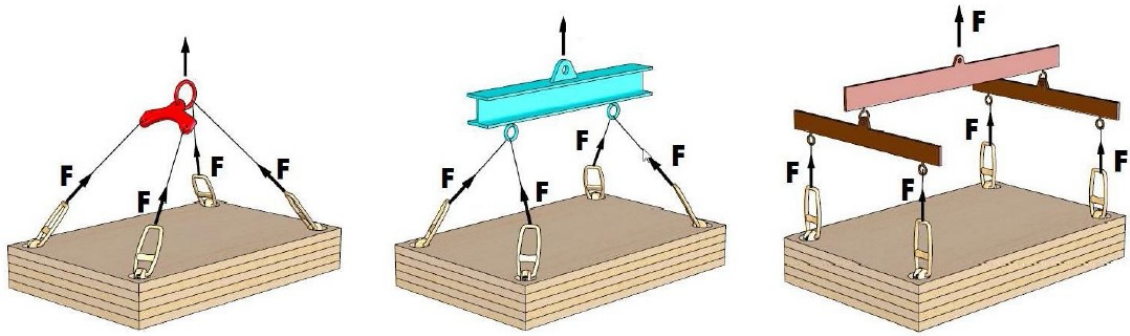
3.6.2 Tilaelementin nosto

Tilaelementtejä käsitellään nostamalla sekä tehtaalla että työmaalla. Tilaelementin painon on oltava sellainen, että sekä tehtaalla että työmaalla nostokapasiteetti riittää sen nostamiseen. Tilaelementin paino on syytä määrittää riittävän tarkasti, jotta nostokaluston valinnassa ei tulisi tarpeetonta ylimitoitusta ja ylimääräisiä kustannuksia. Tilaelementit olisi hyvä myös suunnitella keskenään suunnilleen saman painoisiksi, jotta yhden painavan tilaelementin takia ei tarvitsisi hankkia työmaalle kapasiteetiltaan suurempaa nostokalustoa. Märkätilan paino neliötä kohti on huomattavasti kuivia tiloja suurempi, joten tekniikkamoduulit täytyy tarvittaessa suunnitella kooltaan pienemmiksi kuin huonemoduulit (Stora Enso 2016a). Märkätilan suurempi paino vaikuttaa myös siihen, että paino jakautuu tilaelementin sisällä epätasaisesti.



Kuva 3.20. Staattisesti määrittämätön ripustussysteemi, jossa vain kaksi vastakkaista nostopistettä voidaan olettaa toimiviksi. (Werner 2014)

Tilaelementin muodosta johtuen nosto tulee tehdä vähintään neljästä pisteestä. Neljän pisteen nostossa kuorma jakautuu kuitenkin epätasaisesti nostopisteiden välillä, mikäli ei käytetä kuormaa tasaavia nostopalkkeja tai muuta kuormaa tasaavaa systeemiä. (Betonteollisuus ry 2010) Kuorman epätasaista jakautumista nostopisteiden välillä on havainnollistettu kuvassa 3.20 ja esimerkkejä kuorman tasaamisesta on esitetty kuvassa 3.21.



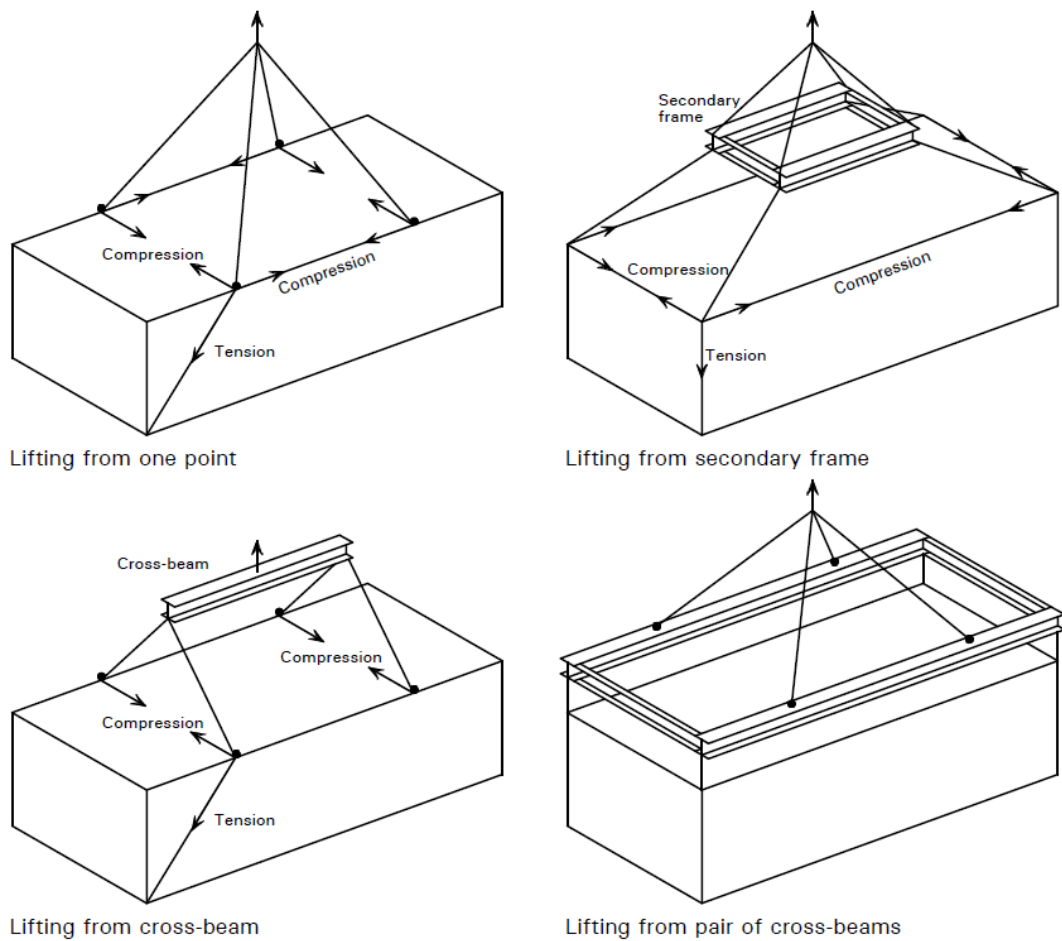
Kuva 3.21. Erilaisia tapoja tasata kuormaa nostopisteiden välillä. (Werner 2014)

Erityisesti aukkojen ylä- ja alapuoliset palkit joutuvat rasitetuiksi tilaelementtien pitkällä sivuilla. Tilaelementin suuri paino tai aukotusten koko ja sijainti voivat johtaa siihen, että tilaelementti ei kestä noston aiheuttamia rasituksia neljästä pisteestä nostettaessa. Silloin nostopisteitä voidaan lisätä kuuteen tai kahdeksaan. Rakennesuunnittelijoiden haastatteluissa kuitenkin ilmeni, että nostopisteiden lisäämisen ongelmana on se, että tällaisiin nostoihin soveltuvaa nostokalustoa voi olla vaikea hankkia ja rakennusliikkeillä ei ole kovin paljon kokemusta tällaisista nostoista. Myös kuormantasausjärjestelyt muodostuvat entistä hankalammiksi nostopisteiden määrän kasvaessa. (Hentinen 9.12.2016)



Kuva 3.22. Tilaelementin nostaminen tasauspalkkien ja tilaelementin alta kiertävien nostoliinojen avulla. (Kuva: Minna Roponen)

Nostoraksien tulee olla sellaisessa kulmassa, että voiman vaakakomponentti ei muodostu suureksi. Tilaelementtiin syntyviä rasituksia erilaisissa nostotavoissa on havainnollistettu kuvassa 3.23. Yleensä nostopalkkien tai –kehien käyttö on tilaelementtien nostossa välttämätöntä, jotta nostosta ei aiheutuisi vaakasuuntaisia rasituksia. (Lawson ym. 1999) Rakennesuunnittelijoiden haastattelujen mukaan CLT-tilaelementtien nostot onkin pyritty tekemään aina tasauspalkkien avulla kohtisuoraan ylöspäin (Hentinen 9.12.2016). Kohdeaineistossa tilaelementtien nostoja on tehty nostoliinoilla tilaelementin alta (kuva 3.22) ja CLT-runkoon kiinnitetyistä nosto-osista tilaelementin päältä. Yhdeltä seinältään avoimien tilaelementtien tapauksessa joudutaan käyttämään noston aikaisia tukirakenteita avoimella sivulla (Stora Enso 2016a).



Kuva 3.23. Tilaelementteihin syntyvät rasitukset erilaisissa nostotavoissa. (Lawson ym. 1999)

Nostossa tilaelementti saattaa heilua, ja tämä tulee huomioida nostoelimien mitoituksessa dynaamisella kertoimella (Werner 2014). Nostojen suunnittelun yksi haaste on kuitenkin se, että vakiintuneita suunnitteluohjeita ei ole. Paikallaan pysyvällä ajoneuvonosturilla tai torninosturilla tehtävissä nostoissa dynaamisen kertoimen arvo on lähteestä

riippuen suuruusluokkaa 1,1 – 1,4 (Werner 2014; Betoniteollisuus ry 2010). Liikkuvalla nosturilla tulee kuitenkin käyttää suurempia arvoja.

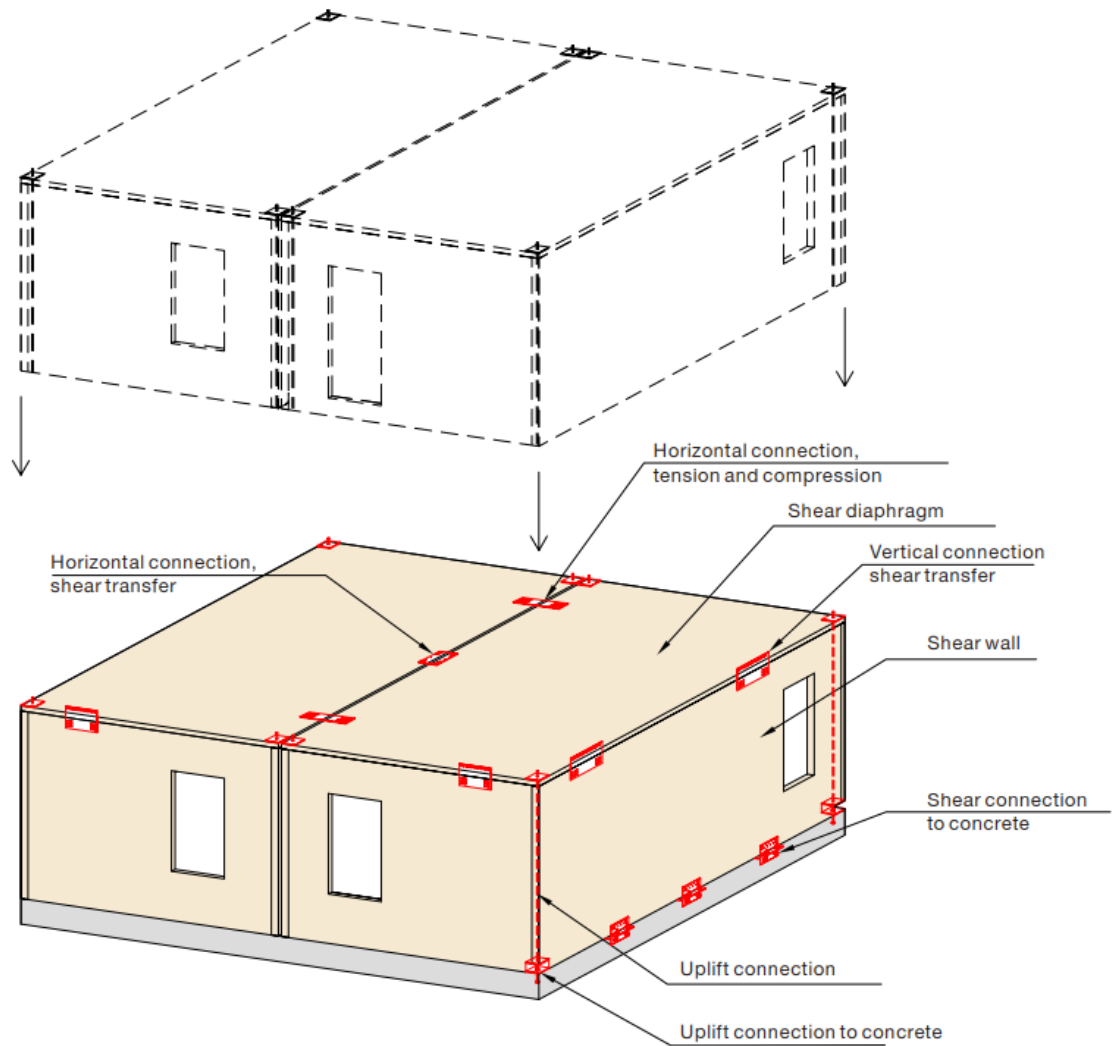
Haastattelun (Hentinen 9.12.2016) pohjalta päädyttiin kolmeen tekijään, joilla arkkitehti pystyy edesauttamaan tilaelementin nostettavuutta:

- 1) **Tilaelementin paino.** Arkkitehtisuunnitelma määrää tilaelementin koon ja siten myös painon. Raskaan tilaelementin nostossa tilaelementtiin kohdistuvat rasitukset ovat suurempia.
- 2) **Aukotus.** Aukkojen ylä- ja alapuolelle tulisi varata riittävän korkeat aukkopalkit, jotta ne kestäisivät nostosta syntyvät rasitukset.
- 3) **Nostopisteiden sijainti.** Nostopisteiden sijoittaminen aukkopalkkien kohdalle on ongelmallista, joten arkkitehdin olisi hyvä huomioida, että tilaelementissä olisi ehjää seinää molemmilla puolilla tilaelementtiä nostopisteiden optimaalisilla sijaintikohdilla.

3.6.3 Asennusjärjestys työmaalla

Tilaelementtien asennusjärjestys vaikuttaa olennaisesti suunnitteluratkaisuihin, kuten LVIS-reititykseen, teräsosien sijoitteluun, jäykistävien seinien valintaan, liitosdetaljeihin ja asennusaikaiseen sääsuojaukseen (Stora Enso 2016a). Tästä johtuen asennusjärjestys tulee lukita jo aikaisessa suunnittelun vaiheessa.

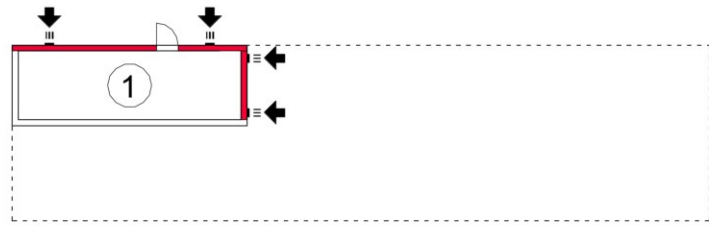
Asennus etenee asunto kerrallaan. Yleensä porrashuoneen vieressä sijaitseva tekniikkamoduuli asennetaan ennen huonemoduulia. Tilaelementit kiinnitetään pystysuunnassa esimerkiksi teräsosilla alapuoliseen tilaelementtiin/perustuksiin sekä vaakasuunnassa kattolaattojen päältä toisiinsa. Porrashuoneen rakenteet asennetaan tilaelementtien väliin kunkin kerroksen asennuksen yhteydessä. Tilaelementtien asennuksen jälkeen viimeistellään saumakohdat ja kytketään talotekniset järjestelmät sekä porrashuoneen puolella että huone- ja tekniikkamoduulien välillä. (Stora Enso 2016a)



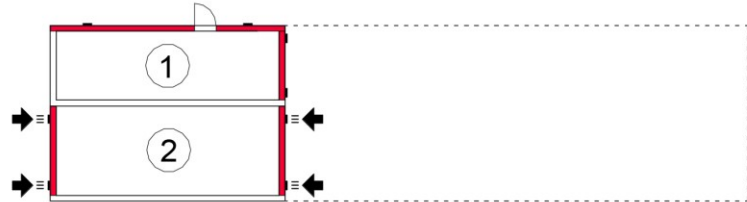
Kuva 3.24. Tilaelementtien kiinnitys toisiinsa teräsoilla Stora Enson tilaelementtijärjestelmässä. (Stora Enso 2016a)

Asennusjärjestys vaikuttaa erityisesti seinien leikkausosien kiinnitykseen ja sen myötä jäykistävien seinien valintaan. Kahden tilaelementin väliin jäävään rakoon ei mahdu asentamaan liitososia, joten seinän liitososat kiinnitetään ennen viereisen tilaelementin asentamista. Tämä johtaa siihen, että leikkausosat pystytään kiinnittämään vierekkäisistä seinistä ainoastaan toiseen ja vain tämä seinä pystyy toimimaan varsinaisena jäykistävänä seinänä. (Stora Enso 2016a) Asennusjärjestyksen vaikutusta leikkausosien kiinnitykseen on havainnollistettu kuvassa 3.25.

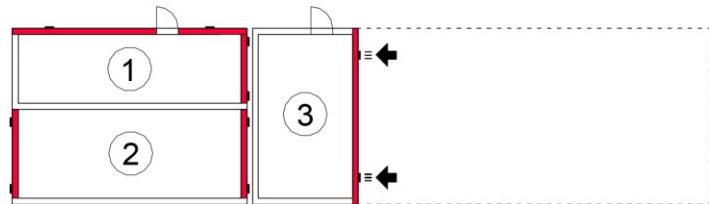
1. Tilaelementin asennus



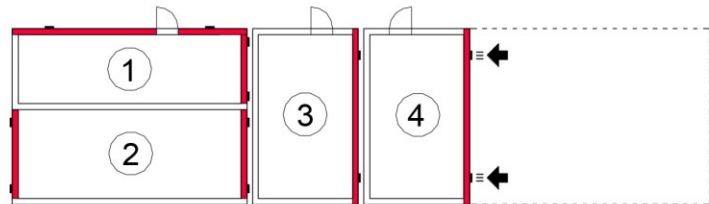
2. Tilaelementin asennus



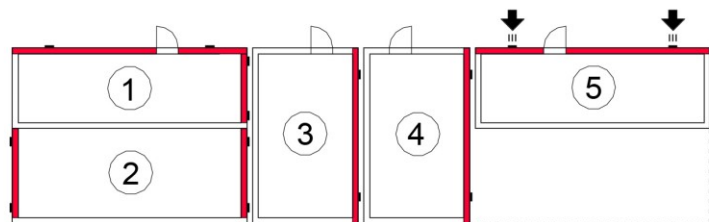
3. Tilaelementin asennus



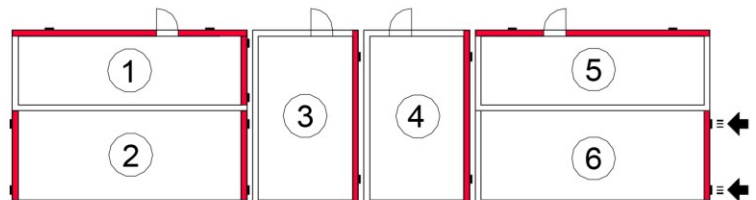
4. Tilaelementin asennus



5. Tilaelementin asennus



6. Tilaelementin asennus



Kuva 3.25. Tilaelementtien asennusjärjestyksen vaikutus leikkausosien kiinnittämiseen ja jäykistävien seinien valintaan. Teräsosien kiinnittäminen seinien väliin ei onnistu enää sen jälkeen, kun molemmat vierekkäisistä tilaelementeistä ovat paikoillaan. Jäykistävät seinät on korostettu värillä.

Yksi asennusjärjestyksessä huomioitava asia on myös se, mitkä rakenteet tukeutuvat toisiinsa. Mikäli käytetään huonemoduuleja, jotka ovat yhdeltä seinältään avoimia, tulee asennusjärjestyksessä huomioida lattia- ja kattolaatan tuenta. Tekniikkamoduuli asennetaan tällöin ensin, jotta siihen kytkettävän huonemoduulin lattia- ja kattolaatan reunat pystytään asettamaan tekniikkamoduulin kyljessä olevien tukien päälle. (Stora Enso 2016a)

Asennusjärjestys vaikuttaa myös siihen, mitkä osat tilaelementteihin voidaan asentaa valmiiksi jo tehtaalla. Jos liitoksissa käytettävät teräsosat on kiinnitetty tilaelementtiin valmiiksi, ne saattavat ulkonevina osina muodostaa esteen viereisen tai päälle tulevan tilaelementin asennukselle (Stora Enso 2016a). Tällaisessa tilanteessa kyseinen teräsosa on kiinnitettävä paikalleen vasta työmaalla. Pyrkimyksenä on kuitenkin se, että mahdollisimman suuri osa teräsosista olisi tilaelementeissä valmiina, jotta työmaalla tehtävien työvaiheiden osuus saataisiin minimoitua.

4. ARKKITEHTISUUNNITTELUN ERITYISKYSYMYKSIÄ

Tilaelementtien teollinen valmistamistapa ja kuljetuksen ja käsittelyn aiheuttamat mittarajoitteet luovat tilaelementtikerrostalon suunnittelulle arkkitehtonisesti mielenkiintoisen ja kiehtovan lähtökohdan. Tilaelementtikerrostalon massoittelussa lähtökohtana on rajatun kokoinen tilayksikkö, jota toistamalla ja pinoamalla muodostetaan rakennuksen kokonaishahmo. Tilaelementin koko ei kuitenkaan ole ainoa teollisen tuotantotavan asettama reunaehto, vaan toteutuskelpoiseen suunnitteluratkaisuun pääseminen edellyttää ymmärrystä myös tehdastuotannon taloudellisuuteen vaikuttavista tekijöistä sekä tilaelementtikerrostalon rakennusteknisistä lainalaisuuksista.

Tilayksiköiden teollinen tuotantotapa asettaa suunnittelulle vaatimuksia, jotka ovat usein ristiriidassa arkkitehtonisten tavoitteiden kanssa. Arkkitehdin tehtävänä on perinteisesti ollut löytää rakennukselle ympäristöönsä sopiva ratkaisu kunkin paikan erityispiirteiden mukaan. Toistuvuuteen ja standardointiin perustuva massatuotanto voidaan nähdä uhkana tälle tavoitteelle. Myös pelko arkkitehtuurin latistumisesta liian toistuvuuden myötä voi olla aiheellinen. (Smith 2010)

Jouni Liimatainen toi haastattelussa (12.8.2016) esille sen, että suunnittelijoiden koulutuksessa painottuu betonirakenteisten asuinkerrostalojen suunnittelu. CLT-tilaelementtitekniikan kehitystyö on vielä alussa ja aiheesta on koulutusta ja kokemusta vielä varsin vähän. Suunnittelu vaatii siis erityistä perehtymistä ja tavanomaisesta poikkeavaa lähestymistapaa tehtävään. Puurakenteisen tilaelementtikerrostalon suunnittelu- ja tuotantoprosessi poikkeaa olennaisesti betonielementteihin perustuvasta kerrostalotuotannosta. Puumateriaali johtaa erilaisiin rakenneratkaisuihin kuin betoni ja erityisesti talotekniikan ratkaisut tuovat lisähaasteita korkeaan esivalmistusasteeseen perustuvassa rakentamistavassa. Jotta tilaelementtirakentaminen olisi kannattavaa, on suunnittelu- ja hankintaprosessissa huomioitava teollinen valmistustapa uudella tavalla.

Tässä luvussa nostetaan esiin joitakin CLT-tilaelementtikerrostalon arkkitehtisuunnitteluun liittyviä erityiskysymyksiä, jotka nousivat esiin haastattelujen ja kirjallisuuden pohjalta. Luvun tarkoituksena on koota yhteen keskeisiksi koettuja tekijöitä, jotka vaikuttavat tilaelementtiarkkitehtuurin toteuttamiskelpoisuuteen, kustannustehokkuuteen ja arkkitehtoniseen onnistumiseen.

4.1 Näkökulmia tilaelementtiarkkitehtuuriin

Tilaelementtikerrostalon massoittelu voidaan tehdä siten, että rakennus ei eroa massoiteltultaan tavanomaisella rakennustekniikalla tehdystä asuinkerrostalosta. Tilaelementtirakenne on kuitenkin mahdollista ottaa myös näkyväksi aiheeksi rakennuksen massoitelussa, jolloin rakennuksen koostuminen laatikkomaisista kappaleista on havaittavissa rakennuksen ulkohahmossa. Tilaelementtejä voidaan korostaa esimerkiksi toisistaan poikkeavilla ulkopinnoilla tai niiden saumakohtat voidaan ottaa erottuvaksi aiheeksi julkisivuissa.

4.1.1 Tilaelementti arkkitehtonisena aiheena

Tilaelementtiarkkitehtuurin mahdollisuuksia käsittelevissä asuntotutkielmissa nousee usein esiin pyrkimys tavanomaisesta poikkeavaan arkkitehtuuriin tilaelementtien sisään- ja ulosvetojen avulla (katso esim. Kotilainen ja Hedman 2015a; Ruutikainen 2015; Özpekmezci & Rappne 2016). Kotilainen ja Hedman (2015a) esittävät, että tilaelementtikerrostalon massoitelun lähtökohtana voi olla reliefimäinen pinta, joka saadaan aikaan julkisivun pienellä syvyysuuntaisella vaihtelulla. Toinen lähestymistapa voi olla se, että yksittäiset tilaelementtien ulosvedot toimivat aksentteina muutoin suorassa julkisivupinnassa. Ulosvedot voivat olla myös kokonaisvaltaisempina aiheena massoitelussa, jolloin rakennuksen ulkohahmoa hallitsevat syvyysuunnassa eri tavoin jäsenellyt tilaelementtikokonaisuudet.

Sisään- ja ulosvetojen teema toistui myös haastatteluissa. Arkkitehtien haastatteluissa tilaelementtitekniikka nähtiin mahdollisuutena reliefimäisten julkisivupintojen muodostamiselle ja uudentylaiselle massoitelulle (Arkkitehti 1 4.10.2016; Arkkitehti 2 10.10.2016). Samoin rakennuttajien haastatteluissa nousi esiin se, että ulokkeiden ja sisäänvedettyjen parvekkeiden toteuttaminen on CLT-tilaelementtitekniikalla kilpailukykyisempää kuin betonirakenteilla. Syynä tähän ovat puun keveys, jäykkyys ja suhteellisen hyvät lämmöneristysominaisuudet, joiden vuoksi kylmäsiltojen muodostuminen on vähäistä. (Ullakko 29.9.2016; Liimatainen 12.8.2016)



Kuva 4.1. Sisäänvedetty parveke As. Oy Jyväskylän Puukuokka 1:ssä. (Kuva: Lauri Lepikonmäki)

Kohdeaineiston tarkastelussa havaittiin, että sisäänvedettyjä parvekkeita on käytetty useassa Suomeen rakennetussa tilaelementtikohteessa. Haastatteluissa todettiin, että tilaelementtikerrostalon parveke on edullista toteuttaa sisäänvedettynä, sillä se voidaan rakentaa tilaelementtiin valmiiksi jo tehtaalla ja esivalmistusaste saadaan siten korkeaksi. (Ullakko 29.9.2016) Sisäänvedetyn parvekkeen nähtiin myös tuovan asuntosuunnitteluun uudenlaista ilmettä, jota betonirakenteella on vaikeampi saavuttaa (Liimatainen 12.8.2016). Yksi näkökulma on myös se, että sisäänvedetyillä parvekkeilla voidaan tuoda asumiseen rauhaa tiiviissä kaupunkiympäristössä (Ruutikainen 2015). Sisäänvedolla parveke saadaan osaksi asunnon tilasarjaa ja se toimii ikään kuin ylimääräisenä huoneena, joka tuo valoa useammasta suunnasta myös pieniin asuntoihin.



***Kuva 4.2.** Tilaelementtien sisään- ja ulosvedoilla leikittelevää arkkitehtuuria Eskolantien puukerrostaloissa Helsingissä. (Kuva: Lauri Lepikonmäki)*

Kohdeaineiston tarkastelussa havaittiin myös se, että CLT-tilaelementtitekniikkaan kohdistuvista odotuksista huolimatta sisään- ja ulosvedoilla leikittelyä on käytetty arkkitehtonisena aiheena ainoastaan yhdessä kohteessa, Eskolantien puukerrostaloissa. Tämä saattaa kertoa siitä, että reliefimäisen arkkitehtuurin toteuttaminen ei ole osoittautunut riittävän kustannustehokkaaksi. Kohdeaineistossa onkin päädytty pääsääntöisesti kokonaisuusmuotoon yksinkertaisiin rakennusmassoihin. Useassa kohteessa monimuotoista ilmettä on sen sijaan luotu poikkeavilla kattomuodoilla.

4.1.2 Teollisesti tuotettu arkkitehtuuri

Tilaelementti on teollisesti valmistettu tuote, johon pätevät tehdastuotannon perusperiaatteet. Siksi tilaelementtikerrostalon suunnittelijoilla tulee olla riittävä ymmärrys tuotantotavan luonteesta ja sen aiheuttamista rajoitteista. Rakennuttajien haastatteluissa nousi esille, että suunnitteluun liittyvät ongelmat ovat osoittautuneet yhdeksi tilaelementtitekniikan suurimmaksi haasteeksi (Liimatainen 12.8.2016; Ullakko 29.9.2016). Samanlaisten tilaelementtien toistuvuudella on oleellinen merkitys, sillä suuren sarjan tekemisellä saadaan merkittäviä säästöjä mm. suunnittelu- ja hankintakustannuksissa sekä tuotannon oppimisen aiheuttamassa tehostumisessa. Osaamisen ja kokemuksen

puutteen vuoksi esivalmistukseen soveltuvia ratkaisuja ei kuitenkaan osata vielä riittävän hyvin suunnitella. (Liimatainen 12.8.2016).

Arkkitehti Ryan E. Smith tuo kirjassaan *Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction* (2010) esiin, että tuotannon laatu ja arkkitehtuurin laatu ovat usein ristiriidassa keskenään. Mitä enemmän tuotannon laatua saadaan parannettua, sitä standardoidumpaa ja latteampaa arkkitehtuurista muodostuu. Yksilöllisesti räätälöidyt suunnitelmat eivät puolestaan johda tuotannon tehokkuuteen. Jotta teollisesti valmistettu arkkitehtuuri saataisiin onnistumaan, tulisi nämä molemmat puolet huomioida.

Edellisessä kohdassa kävi ilmi, että tilaelementtitekniikan uusiin arkkitehtonisiin mahdollisuuksiin kohdistuu paljon odotuksia. Tilaelementtitekniikan toivotaan mahdollistavan julkisivujen ja rakennusmassan reliefimäisyyttä, mikä puolestaan johtaa helposti kerrospohjien monimuotoisuuteen ja toistuvuuden vähentymiseen. Yhtenä syynä suunnitteluun liittyviin ongelmiin saattaakin olla tilaelementtitekniikan mahdollisuuksiin liittyvien odotusten idealistisuus. Smith (2010) esittää, että arkkitehtien keskuudessa on suurta mielenkiintoa teollista rakentamistapaa kohtaan. Toisaalta hän myös väittää varsin kärkevästi, että arkkitehdit ovat usein kiinnostuneita teollisesta tuotannosta vain pintapuolisesti. Teollinen valmistustapa saattaa viehättää siltä osin kuin se tukee arkkitehdin konseptia. Arkkitehti saattaa olla kiinnostunut tilaelementtitekniikasta ainoastaan arkkitehtonisen idean vuoksi tai voidakseen toteuttaa industrialistista tyyliä.

Smith (2010) korostaa, kuinka tärkeää on arvioida, missä tilanteessa tehdastuotannon hyödyntäminen rakentamisessa on kannattavaa. Tilaelementtirakentaminen ei sovi jokaiseen tilanteeseen ja projektiin. Hän kuvailee historian esimerkkejä, joissa teollinen tuotantotapa on ajettu läpi siksi, että sillä on pyritty toteuttamaan arkkitehtonista tai rakenteellista visiota. Päätös tilaelementtitekniikan käytöstä tulisi kuitenkin perustaa aina arvioon siitä, kuinka käyttökelpoinen ja kannattava se on kyseisessä tilanteessa. Tuotantotekniikka on kilpailukykyinen vain silloin, kun sekä toimintaympäristö, projektin organisaatio että teknologia itsessään soveltuvat tekniikan käyttöön. Ilman näitä edellytyksiä visioita ei kannata toteuttaa tilaelementtitekniikalla.

Koska tilaelementtirakentamisen hyödyt saadaan esivalmistuksen kautta, suunnittelun koordinointi ja yhteensovittaminen on ensisijaisen tärkeää. Suunnitelmien on oltava täysin valmiit ennen tuotannon aloittamista, sillä tiloja, materiaaleja, talotekniikkaa ja rakenteellisia ratkaisuja koskevat muutokset ovat vaikeita myöhäisemmässä vaiheessa. (Lawson ym. 1999) Tämä haastaa hankkeen osapuolia ymmärtämään suunnitteluprosessin erilaisen luonteen ja merkityksen tilaelementtihankkeessa. Smith (2010) esittää näkemyksen, että esivalmistettavaa rakennusta suunnittelevan arkkitehdin tulisi nähdä itsensä ennemminkin tuotekehittäjänä. Tuotekehittäjä ei suunnittele tuotetta irrallaan sen valmistusprosessista, sillä projektin kustannus ja tuotantoon kuluva aika määrittelevät tuotteen toteuttamiskelpoisuuden markkinoilla. Koska yhdellä henkilöllä ei voi olla osaamista koko tuotantoketjuun, voi tilaelementtitekniikka menestyä ainoastaan kulttuu-

riassa, jossa eri osapuolet tekevät tiivistä yhteistyötä. Suunnittelu tulisi tehdä tavanomaisista läheisemmässä yhteistyössä muiden suunnittelijoiden ja erityisesti tuotannon edustajien kanssa, jolloin myös heidän kädenjälkensä näkyy lopputuloksessa.

4.2 Pohjapiirroksen muodostaminen tilaelementeistä

Luonnossuunnitteluvaiheessa arkkitehti muodostaa kerrospohjien yleisratkaisun vierekkäin ja päällekkäin asetelluista tilaelementeistä. Tilaelementin rajallinen koko ja perusmuodoltaan suorakaiteen muotoinen pohja vaikuttavat siihen, miten tilat on mahdollista järjestää asunnon sisällä. Erityisesti tilaelementin kapeus rajaa osan pohjapiirrosvaihtoehtoista pois ja muuntojoustavien asuntojen muodostaminen tilaelementeistä on tavanomaista haastavampaa.

Yksittäisen tilaelementin mittojen lisäksi myös rakennuksen sijaintiympäristöllä on olennainen vaikutus siihen, millaiseen mittamaailmaan rakennuksen yleisratkaisussa päädytään. Erityisesti täydennysrakentamisen kohteissa kaupunkiympäristö asettaa paljon vaatimuksia sille, miten tilaelementit voidaan ryhmitellä ja minkä kokoisia ne voivat olla. (Ruutikainen 2013) Ennen kaikkea kaavamääräykset vaikuttavat siihen, minkä kokoinen, muotoinen ja korkuinen rakennus tontille voidaan sijoittaa. Myös ilmansuunnat, näkymien avaamisen mahdollisuudet ja tarve piha- ja katutilojen rajaamiseen ohjaavat erilaisten talotyyppien valintaa (Karjalainen 2002). Jokaisen rakennuspaikan asettamat yksilölliset vaatimukset johtavat siihen, että vakioitujen tilaelementtien käyttäminen voi olla vaikeaa. Kohdeaineiston perusteella voidaan tehdä havainto siitä, että jokainen kohde on räätälöity yksilöllisesti tonttiin ja haluttuun huoneistojakaumaan sopivaksi. Myös yksilöllisesti suunnitellussa tilaelementtikerrostalossa on kuitenkin syytä pyrkiä soveltamaan tilaelementtien teollista tuottavuutta tukevia periaatteita.

4.2.1 Tilaelementin mittojen vaikutus asutosuunnitteluun

Muuntojoustavuuden puute on nähty asuntorakentamisen haasteena. Muuntojoustavuus on erityisesti tilaelementtikerrostalolle suuri haaste, sillä järjestelmä ei helposti tuota muuntojoustavia ratkaisuja. Tilaelementin leveys, pituus ja pohjamuoto asettavat reunaehdot kerrostalon pohjapiirroksen suunnittelulle. (Kotilainen & Hedman 2015a)

Tilaelementtien asettamat reunaehdot tulivat ilmi myös arkkitehtien haastatteluissa. Toimivien asuntojen muodostamista suorakaiteen muotoisista yksiköistä ei kuitenkaan koettu ongelmaksi. Kaikki haastatellut arkkitehdit totesivat tilaelementtitekniikan asettamien reunaehtojen rajoittavan asutosuunnittelun mahdollisuuksia. Toisaalta tuotiin esille, että rajoitteet eivät kuitenkaan estä hyviin ratkaisuihin pääsemistä (Arkkitehti 1 4.10.2016; Arkkitehti 2 10.10.2016). Tilaelementtikerrostalon asutosuunnittelua ei myöskään koettu tavanomaista vaikeampana (Arkkitehti 2 10.10.2016; Arkkitehti 3 19.12.2016).

Tilaelementin rajallisesta koosta johtuen tilaelementtikerrostalossa on paljon kantavia seiniä ja tilajaon variaatiot ovat siten rajoitetummat. Kun asunto muodostuu kahdesta tilaelementistä, niiden väliin jää huoneistoa jakava seinä, jonka aukotuksessa on huomioitava rakenteiden kestävyys. Asuinhuoneistojen muuntojoustavuutta helpottaisi, jos huoneiston sisäiseen seinään voisi tehdä laajoja aukkoja ja siten joustavammin yhdistää eri tilaelementeissä sijaitsevia huonetiloja toisiinsa. (Kotilainen & Hedman 2015a)

Kotilainen ja Hedman (2015b) mainitsevat, että kenties tärkein asunnon muuntojoustavuuden tekijä on tilojen riittävä koko. Jos tila on riittävän suuri, sen tilajakoa ja käyttötarkoitusta on helppo muuttaa kalustuksen avulla eri elämäntilanteissa. Asunnon suurempi koko kuitenkin nostaa sen hintaa ja tilamitoitukseltaan minimiin vietyjen asuntojen myyminen on yleensä taloudellisesti kannattavampaa. Tämä on johtanut yhdenmukaiseen asuntotuotantoon, joka harvemmin tarjoaa poikkeavia ratkaisuja. (Kotilainen & Hedman 2015b)

Vaikka tilaelementin koko rajoittaakin pohjapiirroksen suunnittelua, se on kuitenkin riittävän suuri antaakseen mahdollisuuden avarien ja monipuolisesti kalustettavien huoneiden muodostamiseen. Kotilainen ja Hedman (2015b) mainitsevat, että muuntojoustavuudeltaan hyvän asuinhuoneen koko voisi olla esimerkiksi 3,6 m x 3,6 m. Tilaelementissä tällaiset mitat saavutetaan helposti, joten rakennusteknistä estettä riittävän kokoisten asuinhuoneiden muodostamiselle ei ole. Tilaelementin kapeudesta johtuen huonetilat on kuitenkin yleensä sijoitettava tilaelementtiin peräkkäin. Arkkitehtien haastattelussa tuli ilmi, että erityisesti tilaelementin leveysmitta rajoittaa tilajärjestelyjen mahdollisuuksia tilaelementtien sisällä. Kahden asuinhuoneen sijoittaminen vierekkäin tilaelementin kapeammassa suunnassa ei yleensä ole mahdollista. Tilaelementin muuntojoustavuutta parantaisi kuitenkin se, jos tilaelementistä olisi mahdollista tehdä niin leveä, että siihen voisi tehdä kaksi pientä makuuhuonetta vierekkäin. (Arkkitehti 1 4.10.2016)

4.2.2 Tilaelementtijako ja toistuvuus

Tilaelementtijakoa suunnitellessaan arkkitehti tekee merkittäviä kustannuksiin vaikuttavia valintoja. Alle on koottu rakennuttajien haastatteluissa esiin nousseet kolme pääperiaatetta kustannustehokkaasta tilaelementtijaosta. Jotta päästäisiin kustannustehokkaan tilaelementtijakoon, arkkitehdin tulisi huomioida seuraavat tekijät:

- 1) **Tilaelementin koko ja muoto.** Tilaelementtien koko ja muoto tulee valita siten, että kuljetukset ja nostot pystytään toteuttamaan taloudellisesti. Tilaelementin koossa on huomioitava myös tuotantolaitoksen asettamat koko- ja painorajoitteet. (Liimatainen 12.8.2016)
- 2) **Tilaelementtien kappalemäärä.** Tilaelementtien kappalemäärä tulisi minimoida jakamalla rakennus mahdollisimman täysikokoisiin tilaelementteihin, sillä

jokaisesta tilaelementistä aiheutuu erilliset suunnittelu-, nosto- ja kuljetuskustannukset (Liimatainen 12.8.2016).

- 3) **Tilaelementtien toistuvuus.** Samanlaisten tilaelementtien toistamisella on todettu olevan merkittävä vaikutus tuotannon taloudellisuuteen (Rogan ym. 2000; Liimatainen 12.8.2016; Ullakko 29.9.2016). Suunnittelu- ja hankintakustannukset laskevat, mitä suurempi tuotantosarja samanlaisia tilaelementtejä tehdään (Lawson & Ogden 2010; Liimatainen 12.8.2016).

Tilaelementtijaon peruseriaate on oikeastaan varsin yksinkertainen ja helposti ymmärrettävä: rakennus pitäisi pystyä kokoamaan mahdollisimman pienestä kappalemäärästä mahdollisimman samanlaisia komponentteja, joita on helppo kuljettaa ja käsitellä. Tilaelementtien toistuvuutta voidaan lisätä esimerkiksi toteuttamalla kaikki kerrokset samanlaisina. Tilaelementtitekniikka soveltuu myös hyvin pienasuntokohteisiin, kuten hotelleihin ja asuntoloihin, sillä niihin pystytään saamaan paljon toistuvuutta sopivan kokoisina yksikköinä.



Kuva 4.3. As. Oy Seinäjoen Mäihässä tilaelementteihin on saatu toistuvuutta samanlaisilla kerroksilla. Arkkitehtuurin tuo vaihtelua poikkeava kattomuoto. (Kuva: Lauri Lepikonmäki)

Haastatteluissa tuotiin esille, että suunnittelu- ja hankintakustannusten alenemisen lisäksi suurempi tuotantosarja mahdollistaa tuotannon oppimisen aiheuttaman tehostumisen. Sadannen samanlaisen tilaelementin tekemiseen menee huomattavasti vähemmän aikaa kuin ensimmäiseen. (Liimatainen 12.8.2016) Toisaalta pienet erot esim. tilaelementin pituudessa tai julkisivussa eivät välttämättä tee suurta eroa kustannuksiin, jos tilaelementit ovat muutoin samanlaisia. Talo voi olla ulospäin monimuotoinen, vaikka asunnot olisi tehty lähes samanlaisista tilaelementeistä. (Ullakko 29.9.2016) Erot tilaelementtien välillä lisäävät kuitenkin tarvittavien elementtikuvien määrää. Pienet eroavaisuudet tilaelementtien välillä eivät vaikuta niinkään tuotannon tehokkuuteen, vaan ennen kaikkea suunnittelun tehokkuuteen (Tilaelementtitehtaan 1 edustaja 9.12.2016).

Haastatteluissa todettiin, että tilaelementtitekniikka vaikuttaa siihen, minkälaiset asuntotyytit pystytään toteuttamaan kustannustehokkaasti. Yksiön rakentaminen tilaelementtitekniikalla on kustannustehokasta, sillä se voidaan tehdä yhdestä täysikokoisesta tilaelementistä. Kolmio on puolestaan kustannustehokas silloin, kun se tehdään kahdesta täysimittaisesta tilaelementistä. Sen sijaan kahdesta pienestä tilaelementistä toteutettava 40 - 50 m²:n kaksio tulee neliöhinnaltaan suhteessa kalliimmaksi, koska siinä ei pystytä hyödyntämään täysikokoisia tilaelementtejä. (Liimatainen 12.8.2016)

4.2.3 Porrashuone

Tilaelementtikerrostalon kerrospohja muodostuu porrashuoneen ympärille jäsennellyistä tilaelementeistä. Tilaelementtikerrostalossa porrashuoneelle ei pääsääntöisesti tarvitse rakentaa omia seiniä, vaan seinät muodostuvat porrashuonetta ympäröivien tilaelementtien seinistä. Kerrostaso- ja porraselementit voidaan tukea porrashuonetta ympäröivien tilaelementtien rakenteisiin. (Stora Enso 2016a)

Tilaelementtikerrostalon suunnittelussa tulisi pyrkiä siihen, että talotekniikan pystynousut keskitettäisiin porrashuoneisiin. Asuntojen sisäiset hormit aiheuttavat paljon paikallarakentamista ja alentavat siten tilaelementin esivalmistusastetta. Sijoittamalla kaikki pystynousut porrashuoneeseen saavutetaan useita etuja: ääni- ja paloteknisesti haastavat välipohjalävistyksiset saadaan vältettyä huoneistoissa, talotekniikan huoltaminen ja tarkastaminen on porrashuoneen puolelta helpompaa, viemärimelun haitat vähenevät ja talotekniset kytkennät pystytään tekemään omana työvaiheenaan rungon pystyttämisen jälkeen (Lahtela 2014b). Hormien sijoittaminen porrashuoneeseen nousi myös rakennuttajien haastatteluissa keskeiseksi tekijäksi, joka arkkitehdin tulisi huomioida suunnittelussaan. (Liimatainen 12.8.2016; Ullakko 29.9.2016).



Kuva 4.4. Porrashuoneen reunoilla kiertävä talotekniikkavyöhyke VTS Koukkurannankatu 10:ssä. Talotekniikan pystynousut on helppo rakentaa porrashuoneen puolella omana työvaiheenaan tilaelementtien asennuksen jälkeen. Lopuksi hormit suljetaan kevytrakenteisilla seinillä. (Kuva: Senni Sorri)

Arkkitehtien haastatteluissa nousi esiin sellainen näkökulma, että tilaelementtirakenteella porrashuoneesta muodostuu helposti tavanomaista suurempi. Käytävät muodostuvat pitkiksi, eikä päätyasuntoja pystytä levittämään porraskäytävän puolelle tilaelementin suorakaidemuodosta johtuen. Tämä johtaa siihen, että käytävään muodostuu ylimääräisiä neliöitä, joita ei pystytä ottamaan mukaan myytäviin asunoneliöihin. Myös hormien sijoittuminen porrashuoneeseen kasvattaa porrashuoneen kokoa ja saattaa tehdä kerros-pohjista tehottomia. (Arkkitehti 1 4.10.2016)



Kuva 4.5. Avara porrashuone As. Oy Jyväskylän Puukuokka 1:ssä. Porrashuoneeseen on voitu jättää näkyviä CLT-pintoja kohdekohtaisen paloteknisen hyväksynnän perusteella.. (Kuva: Lauri Lepikonmäki)

Tilaelementtikerrostalon suuri porrashuone nähtiin kuitenkin rakennuttajien haastatte-
luissa arkkitehtonista laatua, asumisviihtyvyyttä ja esteettömyyttä parantavana mahdol-
lisuutena. Jouni Liimatainen (12.8.2016) luetlee syitä, miksi As. Oy Jyväskylän Puu-
kuokassa 1:ssä toteutettiin porrashuone tavanomaista suurempana: ”Puukuokassa kaava
salli sen, että porrashuoneesta laskettiin kerrosalaan vain 15 m^2 /kerros. Rakennuksen
alla oleva autohalli vaikutti rakennuksen dimensioihin, talotekniikan nousut oli mahdol-
lista sijoittaa kustannustehokkaasti isoon porrashuoneeseen ja isolla porrashuoneella
saavutettiin arkkitehtonisia etuja. Puukuokan keskikäytävä on eräänlainen pihakatu.
Tavanomaisista minimiporrashuoneista poiketen ihmiset jopa tervehtivät toisiaan.”
Sekä Liimatainen että Ullakko (29.9.2016) nostivat esiin myös sen, että CLT:n hyvistä
lämmöneristysominaisuuksista johtuen porrashuoneet on mahdollista toteuttaa kusan-

nustehokkaasti puolilämpiminä. Ullakko mainitsi myös, että kerrostasolaattojen asentaminen tilaelementtien väliin on varsin edullinen tapa rakentaa porrashuone, mutta suuren porrashuoneen rakentaminen edellyttää sitä, että kaikkia käytävaneliöitä ei tarvitse laskea kerrosalaan.

4.2.4 Tilojen sijoittelu talotekniikan näkökulmasta

Tilaelementtijaon ja toistuvuuden lisäksi tilaelementtituotannon tärkeä peruseriaate on pyrkimys mahdollisimman korkeaan esivalmistusasteeseen ja pieneen paikalla rakentamisen osuuteen. Talotekniset ratkaisut tulisi siis suunnitella siten, että ne pystytään asentamaan mahdollisimman valmiiksi jo tehtaalla. Taloteknisten ratkaisujen korkealla esivalmistusasteella on merkittävä vaikutus tilaelementtikerrostalon kustannustehokkaiseen toteutettavuuteen ja arkkitehti pystyy vaikuttamaan siihen ennen kaikkea tilojen tarkoituksenmukaisella sijoittelulla.

Tilojen sijoittelun peruseriaatteena on se, että kahdesta tilaelementistä koostuva asunto jaotellaan tekniikkamoduuliin ja huonemoduuliin. Märkätilat, talotekniset laitteet ja kytkennät keskitetään porrashuoneen vieressä sijaitsevaan tekniikkamoduuliin. Myös keittiö sijoitetaan ensisijaisesti tekniikkamoduuliin. Huonemoduuli sisältää sen sijaan vain kuivia huonetiloja. Näin saadaan minimoitua putkivedot tilaelementtien välillä ja LVIS-järjestelmät pystytään yhdistämään suoraan porrashuoneen puolella sijaitseviin pystynousuihin. (Stora Enso 2016a)

Asunnon jakaminen tekniikkamoduuliin ja huonemoduuliin tuo varsin paljon rajoitteita pohjapiirroksen suunnittelulle. Jako ei kuitenkaan estä arkkitehtonisesti laadukkaiden ratkaisujen löytämistä. Tiia Ruutikainen (2013) esittelee diplomityössään ajatuksen päämoduulista ja apumoduulista. Apumoduuliin sijoittuvat asunnon pienemmät aputilat, kuten märkätilat, keittiö, eteinen ja säilytystilat. Päämoduuli voi puolestaan olla yhtenäistä avointa tilaa, jota on helppo muunnella. Tällaisella vyöhykeajattelulla voidaan maksimoida asunnon vapaan tilan määrä, sillä talotekniikka saadaan keskitettyä ja jäljelle jäävä tila on vapaa väliseinistä. Tämä asunnon jakamisen logiikka tukee hyvin ajatusta tekniikan keskittämisestä yhteen moduuliin.

Rakennuttajien haastatteluissa tuli vahvasti esiin se, että märkätilat tulisi aina sijoittaa porrashuoneen vastaiselle seinälle hormien viereen. Näin talotekniikka ja erityisesti viemärit saadaan yhdistettyä mahdollisimman lyhyillä vedoilla. (Liimatainen 12.8.2016; Ullakko 29.9.2016) Asuntosuunnittelussa tämä tarkoittaa sitä, että asunnon märkätila sijoittuu yleensä heti sisäänkäynnin viereen. Arkkitehtien haastatteluissa tuli ilmi, että märkätilan sijoitusperiaate on merkittävä asuntosuunnittelun vapautta rajoittava tekijä tilaelementtikerrostalossa (Arkkitehti 1 4.10.2016).

Keittiön sijoittaminen on asunnon pohjapiirroksessa hieman vapaampaa kuin märkätilan sijoittaminen. Rakennuttajien haastatteluissa korostui tärkeänä asiana se, ettei keittiön

viemäriä vietäisi CLT-lattian alapuolelle (Liimatainen 12.8.2016; Ullakko 29.9.2016). Tällainen viemäriasennus aiheuttaa paljon paikallarakentamista ja alentaa tilaelementtien esivalmistusastetta. CLT-lattian alapuoliseen asennukseen saattaa johtaa se, että viemäriä ei pystytä piilottamaan esim. kiintokalusteiden sokkeleihin tai viemärireitti muodostuu niin pitkäksi, ettei lattiapinnan yläpuolinen tila riitä kaatojen toteuttamiseen. Arkkitehtisuunnitelmassa olisi siis tärkeää huomioida keittiön viemärireitin toteuttavuus.



Kuva 4.6. Keittiön viemärin johtaminen porrashuoneeseen kiintokalusteiden sokkeleissa sekä lattian yläpuolisessa kotelossa VTS Koukkurannankatu 10:ssä. (Kuva: Senni Sorri)

Keittiön tulisi sijaita ensisijaisesti tekniikkamoduulin puolella, jotta moduulien välisiä talotekniikan kytkentöjä jäisi mahdollisimman vähän tehtäväksi työmaalla. Arkkitehtonisen ratkaisun vaatiessa keittiö on kuitenkin mahdollista sijoittaa myös huonemoduulin puolelle, jos siitä aiheutuvat kustannukset ovat hyväksyttäviä ja viemäri pystytään viemään porrashuoneen hormiin riittävän lyhyttä reittiä lattian yläpuolisena asennuksena.

4.3 Puun käyttö pintamateriaalina

Puumateriaalilla on erityinen asema suomalaisten kokemusmaailmassa. Puu koetaan lämpimänä ja rauhoittavana materiaalina, jota on miellyttävää koskettaa. Puuta voidaan

työstää monella tavalla ja se vanhenee kauniisti patinoituen. Puun monimuotoisuuden ja elävyyden vuoksi sillä on monenlaisia mahdollisuuksia niin sisä- kuin ulkoarkkitehtuurin luomisessa. (Karjalainen 2002)



Kuva 4.7. Vuonna 2014 valmistunut Kiinteistö Oy Turun Palvelukoti on Suomen ensimmäinen P1-paloluokan puukerrostalo. CLT:n käytön runkomateriaalina mahdollisti toiminnallinen paloturvallisuussuunnittelu. Vaikka ensimmäinen kerros tuli tehdä palamattomasta julkisivumateriaalista, haluttiin pääasialliseksi julkisivumateriaaliksi kuitenkin valita puu kertomaan siitä, että kyseessä on puukerrostalo (Takala 30.11.2016). (Kuva: Lauri Lepikonmäki)

P2-luokan puukerrostalon julkisivuverhouksen materiaalin pystyy valitsemaan varsin vapaasti. Lautaverhouksen lisäksi julkisivuissa voidaan käyttää esimerkiksi kuitusementti- tai rappauslevyjä. Julkisivurakenteen tulee kuitenkin mukautua taustarakenteen painumiseen, mikä on huomioitava esimerkiksi tiilijulkisivun suunnittelussa. Vaikka vaihtoehtoja on paljon, on suomalaisessa puukerrostalorakentamisessa kuitenkin koettu luontevana ja asiaan kuuluvana se, että puurunkoisen rakennuksen pääasiallisena julkisivumateriaalina on puuverhous (Karjalainen 2002). Tämä näkyy myös työn taustamateriaalina käytetyssä kohdeaineistossa, jossa puu on haluttu poikkeuksetta ottaa

rakennuksen julkisivumateriaaliksi. Lähes kaikki haastatellut arkkitehdit olivat yhtä mieltä siitä, että julkisivumateriaalin tulisi viestittää, että kyseessä on nimenomaan puukerrostalo. Puukerrostalojen asukkaille tehdyn asukaskyselyn mukaan puumateriaalin näkymistä toivotaan erityisesti julkisivuissa, parvekkeissa ja lattioissa (Karjalainen 2017).

4.3.1 Puujulkisivujen suunnittelu

Puujulkisivuille on tyypillistä se, että pinnat muodostetaan sauvamaisista osista, kuten verhoukslaudoista, rimoista ja listoista. Näiden osien profilointi ja liittämistapa muodostavat pinnan tekstuurin, jonka ilmeeseen vaikuttavat myös verhouksen suunta, dimensiot ja raot. Laajojen julkisivupintojen suunnitteleminen puusta on arkkitehtonisesti haastavaa. Suurimittakaavaiselle puurakentamiselle ei ole ehtinyt vielä muodostua perinnettä samoin kuin pitkän historian muotoilemalle pientalojen puuarkkitehtuurille. Oman lisänsä puukerrostalojen julkisivusuunnitteluun tuovat myös verhouksen pitkäaikaiskestävyys, huollettavuus ja paloturvallisuus. (Karjalainen 2002) Suurimittakaavainen puuarkkitehtuuri edellyttää uudenlaista muotokieltä, sillä betonirakentamiselle tyypillinen sileiden pintojen ja räystäättömien kuutiomaisten massojen estetiikka ei ole puurakentamiselle luontevaa. Arkkitehtuurissa tulisikin hyödyntää puumateriaalin antamia mahdollisuuksia massoittelemalla ja julkisivupinnan tekstuurin rikkaaseen vaihteluun. (Koiso-Kanttila 2000) Elementtirakentamisessa julkisivusommittelun haastetta lisää vielä se, että verhoukset pyritään tekemään valmiiksi jo tehtaalla. Tämä vaatii julkisivujen suunnittelulta ja toteutukselta suurta mittatarkkuutta sekä saumadetaljien huolellista suunnittelua.

Näkyvät saumat on usein koettu esteettisesti ongelmallisina niin puu- kuin betonijulkisivuissakin. Arkkitehtien haastatteluissa näkyvät saumat ja elementtiruudukko miellettiin arkkitehtonista laatua heikentävinä tekijöinä. Andreas Falk pohtii väitöskirjassaan *Architectural aspects of massive timber* (2005) liitosten huolellisen suunnittelun merkitystä. Hän toteaa, että mitä korkeampaa esivalmistusastetta käytetään, sitä suuremmaksi tulee liitosten ja elementtien välisten rajapintojen arkkitehtoninen merkitys. Falk kuvaillee, miten teollinen rakentamistapa on monesti tuottanut itseään toistavia ratkaisuja ja halpaa detailjointia. Tämä voidaan huomata betonikerrostalojen näkyviin jätettävissä elementtisaumoissa, jotka ovat olleet yleisessä käytössä 1970-luvulta lähtien. Elementtien kuljetuksen ja käsiteltävyyden aiheuttamat rajoitteet johtavat suhteellisen tiheään elementtikuvioon julkisivupinnassa. Julkisivusommittelua ohjaavat siis ennemminkin tuotantotapaan liittyvät rajoitteet kuin esteettiset valinnat.

Arkkitehti joutuu pohtimaan kysymystä siitä, tulisiko saumat tuoda esiin vai piilottaa, sillä vaikutus rakennuksen estetiikkaan on suuri. Pienet yksityiskohdat voivat olla ratkaisevan tärkeitä arkkitehtonisen vaikutelman muodostumisessa. Työmaalla asennettava julkisivu antaa enemmän vapauksia saumojen asettelulle ja tiheydelle. Paikalla asennettava julkisivu voidaan koostaa yhtä elementtiä suuremmista kokonaisuuksista, eikä lii-

toskohtien tarvitse noudattaa rakenneosien ääriviivoja. Toisaalta saumat ja liitokset ovat myös tehokas arkkitehtonisen ilmaisun väline, jolla voidaan rajata ja tuoda esiin tiloja ja rakenteita. (Falk 2005)



Kuva 4.8. Tilaelementtien välisiä pystysaumoja Seinäjoen Lintuviita 2:ssa (vasemmalla) ja Helsingin Eskolantien puukerrostaloissa (oikealla). (Kuvat: Lauri Lepikonmäki)

Arkkitehtien haastatteluissa nousi esiin se, että tilaelementtikerrostalon suunnittelussa on tärkeää ottaa saumojen olemassaolo huomioon suunnittelun alusta lähtien. Suunnittelua ei voi lähteä tekemään tehdä sillä oletuksella, että lopputuloksena olisi yhtenäinen, saumaton pinta. (Arkkitehti 1 4.10.2016) Onnistuneen lopputuloksen saavuttamiseksi arkkitehdilla olisi siis hyvä olla jo luonnossuunnitteluvaiheessa näkemys siitä, millä tavalla tilaelementtien väliset saumat ratkaistaan. Hedman ja Kotilainen (2015a) esittävät tähän kolme erilaista lähestymistapaa:

- 1) Saumakohdat viimeistellään näkyvillä listoilla tai pellityksillä ja otetaan osaksi talon arkkitehtuuria.
- 2) Saumakohdat häivytetään visuaalisesti julkisivusommittelun keinoin esimerkiksi sijoittamalla sauma julkisivumateriaalin vaihtumiskohtaan, parvekkeen reunaan tai julkisivun nurkkakohtiin.
- 3) Julkisivuverhous tehdään joko osittain tai kokonaan paikalla rakentaen, jolloin tilaelementtien väliset saumat jäävät kokonaan peittoon.

Kustannustehokkaimpaan ratkaisuun päästään yleensä silloin, kun julkisivuverhoukset ovat tilaelementeissä mahdollisimman valmiina työmaalle tuotaessa. Tällöin työmaalla tehtäväksi jää vain saumojen viimeistely. Korkean esivalmistusasteen saavuttamiseksi

paikalla rakennettava julkisivu ei siis ole suositeltava, mutta joskus se saattaa olla perusteltua tietynlaisen arkkitehtuurin saavuttamiseksi.



Kuva 4.9. Paikalla rakennettu saumaton julkisivuverhous As. Oy Jyväskylän Puukuokka 1:ssä. (Kuva: Lauri Lepikonmäki)

Julkisivulaudoituksen suunnalla on vaikutusta siihen, kuinka näkyviä saumoista muodostuu. Laudoituksen suuntaiset saumat on helppo häivyttää jättämällä saumakohdan ympäriltä muutama lauta työmaalla asennettavaksi. Sen sijaan laudoitusta vastaan koh-tisuorassa suunnassa verhous joudutaan katkaisemaan elementin reunassa, jolloin saumakohta voidaan ratkaista esimerkiksi peitelistalla. Vaakasuuntaisessa verhouksessa näkyviin jäävät siis viereisten tilaelementtien väliset pystysaummat ja pystysuuntaisessa verhouksessa puolestaan kerrosten väliset vaakasaumat.

4.3.2 Puujulkisivun pitkäaikaiskestävyys

Puujulkisivujen trendinä on viime aikoina ollut se, että puun halutaan näyttävän puulta. Sen vuoksi värimaailma on usein luonnonläheinen ja julkisivuissa suositaan kuultokäsittelyjä, jotka jättävät puun vivahteikkaan kuviollisuuden näkyviin ja tuovat pinnalle luonnonmukaisen ulkonäön. Kuultokäsittelyn pitkäaikaiskestävyys on kuitenkin heikko ja huoltoväliksi suositellaan yleensä 2-5 vuotta. Arkkitehtoniset tavoitteet ovat asettaneet uusia haasteita ulkokuullotteiden tuotekehitykselle, jotta puujulkisivuille saataisiin lisää kestävyyttä ja pidempi huoltoväli. (Engblom 2015)



Kuva 4.10. Kuultokäsitellyn puun ohella myös tummat peittomaalatut pinnat näyttäisivät kohdeaineiston perusteella olevan suosittuja 2010-luvun puukerrostaloissa. Kuvassa tummia ja kuultavia puupintoja yhdistävää arkkitehtuuria As. Oy Jyväskylän Puukuokka 1:stä. (Kuva: Lauri Lepikonmäki)

Puujulkisivu joutuu monenlaisen rasituksen alaiseksi. Kosteus- ja lämpötilavaihtelujen lisäksi UV-säteily tuo puujulkisivulle rasitusta, jonka voimakkuus riippuu ilmansuunnasta. Yksi puukerrostalojen julkisivusuunnittelun haaste on se, että korkeassa rakennuksessa pitkätkään räystäät eivät riitä antamaan rakenteellista suojaa kosteusrasitusta vastaan koko julkisivun matkalle. Heikkinen ja Kaila (2015) listaavat puuverhoukseen kestävyYTEEN liittyviä haasteita seuraavasti:

- **Rakenteet ja detaljit:** Rakennerratkaisujen seurauksena kosteusrasitus voi olla hyvin erilainen julkisivun eri osissa. Esimerkiksi lähelle maata tai kattopintaa tulevassa verhouksen alapäässä roiskevesi tai kasautuneesta lumesta tuleva kosteus voi imeytyä herkemmin päätypuuhun.
- **Puun ominaisuudet:** Puuverhous joutuu vaihtelevan kosteus- ja lämpörasituksen alaiseksi, minkä seurauksena siinä tapahtuu puun materiaaliominaisuuksista johtuen muodonmuutoksia. Näitä ovat esimerkiksi lautojen käyristyminen sekä puun halkeilu. Muodonmuutoksia voidaan vähentää valitsemalla riittävän paksu verhouslauta. Myös sahaustapa vaikuttaa muodonmuutosten esiintymiseen.

- **Pintakäsittelyt:** Eri rasitusolosuhteissa olevien pintojen välille voi syntyä värieroja. Puun nopeampi tummuminen rasitetummissa julkisivujen osissa tulee erityisesti näkyviin silloin, kun pinnat on käsitelty kuullotteella.
- **Prosessi:** Puutteellinen kosteudenhallinta voi aiheuttaa puun vaurioitumista jo rakentamisvaiheessa. Julkisivun huoltovälillä ja -tavalla on myös suuri merkitys verhouksen kunnossa pysymiseen.

Jotta ongelmat saataisiin vältettyä, tulee verhouksen suunnittelussa, asennuksessa ja pintakäsittelyssä ottaa huomioon pitkäaikaiskestävyyden asettamat vaatimukset. Karjalainen ja Viljakainen (2013) listaavat, millaisilla toimilla puujulkisivulle voidaan saada mahdollisimman pitkä käyttöikä:

- valitaan riittävän paksu ulkoverhouslauta (suosituksena > 25 mm)
- valitaan riittävän paksu ja tiheä kiinnityskoolaus ja tehdään kiinnitykset huolellisesti tarkoituksenmukaisilla kuumasinkityillä liittimillä
- käytetään hyvälaatuista puutavaraa (kuusta tai männyn sydänpuuta)
- huolehditaan puun riittävästä kuivuudesta pintakäsittelyn ja asennuksen aikana ja kiinnitetään huomiota oikeanlaiseen pintakäsittelyyn
- suojataan verhous rakenteellisesti esim. räystäillä sekä verhouksen alareunan riittävällä etäisyydellä vaakapinnoista
- vältetään suojaamattomia verhouslaudan päitä ja jatkoksia ja estetään sadeveden imeytyminen rakenteisiin esim. tippanokilla ja suojapellityksillä
- varmistetaan että verhous pääsee vapaasti kuivumaan
- tarkastetaan, korjataan ja huolletaan ulkoverhous riittävän usein

Julkisivun säänkestävyydellä voi olla olennainen vaikutus rakennuksen arkkitehtoniseen ilmeeseen. Arkkitehti pystyy vaikuttamaan julkisivun kestävyteen ja ulkonäön säilymiseen erityisesti valitsemalla soveltuvat materiaalit ja pintakäsittelyt sekä huomioimalla suunnitelmassa julkisivun rakenteellisen suojauksen sekä detaljien toimivuuden. Erityisesti vaaleissa kuultokäsittelyissä on riskinä verhouksen epätasainen tummuminen eri tavalla rasitettujen kohtien välillä. Esimerkiksi säälle alttiina oleva julkisivupinta voi muuttaa väriään verrattuna katoksen alla suojassa olevaan verhoukseen ja kattopintaa tai maanpintaa lähellä oleva verhouksen alapää on vaarassa tummua suuremman kosteusrasituksen myötä. Suunnitelmassa tulisikin siis huomioida se, että verhousta ei uloteta liian alas tällaisissa kohdissa.

4.3.3 Puun käyttö sisäpinnoissa

Puun käyttöä kerrostalojen sisätiloissa rajoittavat palomääräykset. Arkkitehtien haastatteluissa nousi esiin toive, että puukerrostalojen sisätiloissa voitaisiin jättää enemmän puupintoja näkyviin. Erityisesti porrashuoneissa puupintojen käyttöön toivottiin enemmän vapautta. (Arkkitehti 1 4.10.2016) Vuonna 2011 voimaan tulleet palomääräykset mahdollistavat puun käytön asuntojen sisätilojen pintamateriaalina, mutta porrashuoneissa pintaluokkavaatimukset ovat tiukemmat. Puukerrostalon palomääräyksiä on käsitelty tarkemmin luvussa 3.3.

Puun käyttöä asuntojen sisäpinnoissa vaikeuttavat erityisesti suojaverhousmääräykset. Pintamateriaalin alla edellytetään asuntojen seinissä ja katoissa suojaverhousta, joka toteutetaan yleensä kipsilevystä. Tämä tarkoittaa sitä, että CLT-pintaa ei pääsääntöisesti voi jättää sisätiloissa näkyväksi pinnaksi. Rakentamismääräyskokoelma mahdollistaa kuitenkin sen, että suojaverhouksen päälle asennetaan puumateriaalista tehty paneeli- tai levyverhous. Kohdeaineiston perusteella tällaista kaksinkertaista verhousta ei ilmeisesti ole nähty kuitenkaan mielekkäänä tai lisäarvoa tuovana ratkaisuna CLT-tilaelementtikerrostaloissa, sillä näkyväksi pinnaksi on lähes aina jätetty suojaverhouksena toimiva kipsilevy. Kohdekohtaisella paloteknisellä hyväksynnällä on kuitenkin joissakin tapauksissa ollut mahdollista jättää CLT-pintoja näkyviin esimerkiksi sisäka-
toissa.

5. RAKENNUSSUUNNITTELUOHJEIDEN MUODOSTAMINEN

Tässä luvussa esitellään, mitkä asiat nähtiin lukuihin 2-4 kootun taustaselvityksen perusteella olennaisiksi ja päätettiin ottaa mukaan CLT-tilaelementtikerrostalon rakennussuunnitteluohjeistukseen. Ohjekortin tarkoituksena on esitellä suunnittelulle sellaisia suuntaviivoja, joilla suurimmat ongelmat suunnitelmien yhteensovittamisessa ja hankkeen kilpailukykyisessä toteutettavuudessa pystytään välttämään. Luku etenee samassa järjestyksessä kuin työn liitteenä esitetty ohjekortti. Jokaisen ohjeen yhteydessä selostetaan, miten kukin ohjeistus laadittiin ja missä muodossa se nähtiin hyväksi esittää.

Ohjekortin kohderyhmäksi valittiin arkkitehdit, jotka ovat suunnittelemassa ensimmäistä puukerrostaloaan. Oletuksena on, että lukijalla on kokemusta asuinkerrostalojen suunnittelusta, mutta ei välttämättä CLT-materiaalista tai tilaelementtitekniikasta. Ohje tähtää arkkitehtisuunnittelun luonnosvaiheeseen, joten sisältö ja tarkkuustaso valittiin tätä tarkoitusta palvelevaksi. Ohjeesta pyrittiin tekemään mahdollisimman yleispätevä, joten siinä vältettiin yksittäisiin toimijoihin sidotun detaljiikan esittämistä.

Diplomityön teoriaosuuden perusteella kartoitettiin niitä arkkitehtisuunnitteluun liittyviä ongelmakohtia, joita voitaisiin helpottaa suunnitteluohjeen avulla. Keskeisiksi ongelmakohdiksi nousivat seuraavat aiheet:

- **CLT-tilaelementtitekniikan heikko tuntemus:**
 - Harvalla on tietoa ja kokemusta tilaelementtirakentamisesta
 - CLT-rakenneratkaisut ovat uusia, vakiintumattomia ja vielä varsin tuntemattomia
- **Ymmärryksen puute teollisen rakentamistavan peruseriaatteista:**
 - Suunnittelussa ei osata huomioida ratkaisujen vaikutusta esivalmistusasteeseen
 - Sarjatuotannon mahdollisuuksien hyödyntäminen jää usein alhaiseksi liian monimuotoisten ratkaisujen myötä
 - Tilaelementtijaon (koko ja kappalemäärä) vaikutusta kustannuksiin ei ymmärretä
- **Suunnittelualojen yhteensovittamisen haasteet:**
 - Erityisalojen suunnittelijat otetaan mukaan liian myöhäisessä suunnittelun vaiheessa

- Märkätilojen, keittiön ja hormien sijoittelu johtaa taloteknisten ratkaisujen alhaiseen esivalmistusasteeseen ja haastaviin läpivienteihin
- Rakennuksen jäykistystä ei huomioida kerrospohjan jäsentelyssä ja seinien aukotuksessa
- Tilaelementin aukotus ja liian suuri paino vaikeuttavat noston suunnittelua
- Kantavien seinien kestävyyttä ei huomioida aukotuksen suunnittelussa

Suunnitteluohjeessa haluttiin esitellä myös sellaisia puukerrostalorakentamisen erityispiirteitä, jotka eivät niinkään ole ongelmia, mutta tekevät CLT-tilaelementtikerrostalon arkkitehtisuunnittelusta poikkeavaa tavanomaisen betonirakenteisen asuinkerrostalon suunnitteluun nähden. Näitä ovat mm. palomääräysten edellyttämät suojaverhoukset ja rakennustarvikeluokat sekä puujulkisivujen suunnittelun erityispiirteet.

5.1 Ohje 1: CLT

Vaikka ohjekortin kohderyhmällä on todennäköisesti jo valmiiksi tietoa CLT-materiaalista, päätettiin kortti aloittaa CLT-materiaalin lyhyellä esittelyllä. Esittelyyn liitettiin valokuva ja piirroskuva, jotka havainnollistavat CLT-levyn rakennetta. Materiaalin esittelyn yhteyteen liitettiin myös diplomityön luvussa 2.1.1 esitelty taulukko eri CLT-valmistajien levyjen mitoista. Taulukon tarkoituksena on antaa heti alussa lukijalle käsitys siitä, minkä kokoluokan rakennustuotteesta on kyse. Listaus eri valmistajien tuotteista toimii myös suunnittelijan tietolähteenä tilaelementin CLT-rungon dimensioiden määrittämisessä. Yksinkertaisuuden vuoksi valmistajien tiedoista esitettiin ainoastaan levyn pituus ja leveys sekä valmistusmaa.

5.2 Ohje 2: Tilaelementtirakentaminen

Tilaelementtirakentamisen periaate esitellään ohjekortissa diplomityön lukujen 2.3 ja 4 sisältöjen pohjalta. Tilaelementtirakentamisen periaate sekä tilaelementtirakentamisen edut esiteltiin tiivistämällä vastaukset seuraaviin kysymyksiin:

- Mitkä ovat CLT-tilaelementtirakentamisen edut?
- Milloin tilaelementtitekniikka kannattaa valita toteutustavaksi?
- Millaisia arkkitehtonisia mahdollisuuksia CLT-tilaelementtitekniikka tarjoaa?
- Miten kerrosalan laskentaan liittyvillä määräyksillä voidaan edistää tilaelementtitekniikan kannattavuutta?

CLT-tilaelementtirakentamisen perusluonteeseen kuuluu pyrkimys sarjatuotannon ja esivalmistuksen mahdollisimman suureen hyödyntämiseen. Ohjekortti esittelee paljon tästä pyrkimyksestä aiheutuvia reunaehtoja, jotka aiheuttavat kenties ikäviäkin rajoitteita suunnittelulle. Siksi lukija haluttiin johdatella heti ohjekortin alussa ymmärtämään tilaelementtirakentamisen perusluonne sekä näkemään tilaelementtitekniikan edut ja

mahdollisuudet. Samalla suunnittelijaa motivoidaan ottamaan tiukat reunaehdot tosis-
saan, jotta nämä edut voitaisiin saavuttaa.

5.3 Ohje 3: Tilaelementin rakenne

Tilaelementtirakentamisen peruseräiteiden ja mahdollisuuksien esittelyn jälkeen oh-
jekortissa siirrytään tarkastelemaan yksittäisen tilaelementin rakennetta. Tilaelementin
rakenteen esittelyyn parhaimmaksi välineeksi valikoituivat havainnekuvat. Ohjekorttia
varten mallinnettiin Revit Architecture -ohjelmalla kaksi 3d-leikkausta tilaelementistä.
Ensimmäisellä havainnekuvalla haluttiin havainnollistaa

- tilaelementin rungon muodostuminen CLT-levyistä
- CLT:n valmistusmittojen vaikutus tilaelementin mittoihin
- märkätilaelementin sijoitusperiaate tilaelementin sisälle.

Toisella havainnekuvalla haluttiin havainnollistaa

- muut rakennekerrokset, kuten eristeet, levytykset, verhoukset ja lattiavalut
- tilaelementin sisältämä talotekniikka
- pintojen viimeistelyt, listoitukset ja kiintokalusteet
- tilaelementin kokoaminen valmiiksi varustelluista tasoelementeistä.

Kuvakulmat valittiin siten, että kaikki nämä asiat oli mahdollista nähdä yhdestä kuvasta.
Erityisen tärkeäksi koettiin talotekniikan havainnollistaminen, joten esimerkkitilaele-
mentiksi valittiin yhdestä tilaelementistä muodostuva yksiö, joka sisältää kaiken asun-
nossa tarvittavan talotekniikan. Malliasuntona käytettiin valmistuneen tilaelementtikoh-
teen yksiötä, jossa on huoneistokohtainen ilmanvaihto ja märkätilaelementillä toteutettu
kylpyhuone. Talotekniikan reitit mallinnettiin kohteen taloteknisiä suunnitelmia mukail-
len ja rakenteita avattiin kuvassa siten, että eri rakenneosat ja -kerrokset havainnollistu-
vat.

5.4 Ohje 4: Tilaelementtikerrostalon rakenne

Yksittäisen tilaelementin rakenteen esittelystä edetään tarkastelemaan sitä, miten tila-
elementit yhdistetään kokonaisiksi kerrostaloiksi. Tilaelementtikerrostalon rakenteen
kuvauksessa tarkoituksena on antaa yleiskuva siitä, miten tilaelementit yhdistetään toi-
siinsa ja mitä muita rakenteita tilaelementtikerrostaloon tarvitaan tilaelementtien lisäksi:
perustukset tai betonirakenteinen kellarikerros, tilaelementtien väliin asennettavat por-
raskäytävän rakenteet, tilaelementtien päälle asennettavat vesikattorakenteet sekä par-
vekkeet. Tähän ohjekortin kohtaan tiivistettiin diplomityön luvun 2.2.2 sisältö.

Tilaelementtikerrostalon rakenteen havainnollistamisvälineeksi valittiin kaaviomainen
leikkauskuva. Leikkaus päätettiin esittää kaaviomaisesti sen vuoksi, että liitosten yksi-

tyiskohdat voivat vaihdella eri toimittajien ja suunnittelijoiden kesken. Kaaviomaisesti esitetty kuva antaa riittävästi tietoa eri rakenneosista, ottamatta kuitenkaan kantaa liitosten ja muiden yksityiskohtien toteutukseen. Näin se soveltuu käytettäväksi useassa eri tilanteessa.

Vaikka liitosten detaljiikka jätettiin esittämättä, haluttiin ohjeessa kuitenkin tuoda esiin muutamia yksityiskohtia, jotka ovat CLT-tilaelementtikerrostalon suunnittelussa tavanomaisesta poikkeavia. Toisessa leikkauskuvassa otetaan tilaelementtikerrostalon rakenteet lähempään tarkasteluun ja nostetaan huomioteksteillä esiin akustiikkaan ja paloturvallisuuteen liittyviä periaatteita, joista suunnittelijan olisi hyvä olla tietoinen. Samassa kuvassa on myös rakennejärjestelmän hahmottamisen tueksi esitetty tyypillisiä rakennetyyppejä, jotta suunnittelija saisi kaaviomaisten esitysten lisäksi konkreettisempaa tietoa rakennejärjestelmästä.

Toteutettujen CLT-tilaelementtikerrostalojen rakennetyypit ovat olleet saman tyyppisiä, mutta esimerkiksi käytettävien CLT-levyjen paksuudet ja erilaiset kipsilevytykset aiheuttavat sen, että rakennetyypeissä on vaihtelua jokaisen kohteen välillä. Lisäksi uudemmissa kohteissa on tilaelementin lattiarakenteena käytetty CLT:n sijasta palkkirakennetta. Vakioratkaisujen puutteesta huolimatta ohjekortissa nähtiin tarpeelliseksi esittää suositusrakennetyypit, joita voi käyttää luonnossuunnittelun pohjana siinä tilanteessa, kun kohdekohtaiset rakennetyypit eivät ole vielä selvillä. Rakennetyypit muodostettiin siten, että ne sopisivat mahdollisimman moneen tilanteeseen. CLT-rakenteiden paksuuksille päätettiin antaa rakennetyypeissä suuntaa-antavat vaihteluvälit kohdeaineiston perusteella. Välipohjalle esitettiin sekä CLT- että palkkirakenteinen vaihtoehto.

5.5 Ohje 5: Paloturvallisuus

Paloturvallisuus-osan lähtökohdaksi otettiin se, että lukijalla on perustiedot asuinkerrostalon paloturvallisuussuunnittelusta. Tämän perusteella ohjeeseen päätettiin poimia vain niitä tekijöitä, jotka puukerrostalossa poikkeavat tavanomaisen betonirakenteisen asuinkerrostalon suunnittelusta.

Suomen Rakentamismääräyskokoelman osassa E1 (2011) ovat P2-paloluokan puukerrostaloja koskevat määräykset ripoteltuna varsin moneen kohtaan. Määräykset ovat myös riippuvaisia siitä, onko rakennuksessa OH-luokan vai 2-luokan sprinkleri ja ovatko julkisivut puuverhoiltuja. Suunnittelun kannalta informaatio saadaan helppokäyttöisemmäksi, kun puukerrostaloa koskevat palomääräykset kootaan kaikki samaan taulukkoon. Ohjekortissa taulukko päätettiin tehdä vielä yksinkertaisemmaksi rajoittamalla se koskemaan vain kaikkein tyypillisimpiä tapauksia:

- 3-4-kerroksinen puukerrostalo, jossa on 2-luokan sprinkleri ja puujulkisivut
- 5-8-kerroksinen puukerrostalo, jossa on OH-luokan sprinkleri ja puujulkisivut

Kuten diplomityön luvussa 4.3 todettiin, suomalaiset puukerrostalot on tavattu tehdä puuverhoilluilla julkisivuilla. Siksi ei nähty mielekkäänä esitellä taulukoissa muita verhousvaihtoehtoja. Ohjekorttia varten laaditut taulukot on esitetty diplomityön teoriaosassa taulukoissa 3.1 ja 3.2.

Koska suojaverhousten ja rakennustarvikeluokkien koodit eivät suoraan selvennä kaikille ohjekortin lukijoille, millaisista rakennustarvikkeista on kyse, päätettiin taulukoihin lisätä esimerkkimateriaalit kunkin suojaverhouksen ja pintaluokkavaatimuksen kohdalle. Esimerkkimateriaalin tarkoituksena on antaa kuva siitä, mitkä pinnat tulee verhoilla esim. kipsilevyllä ja missä voidaan käyttää näkyviä puupaneeli- tai CLT-pintoja.

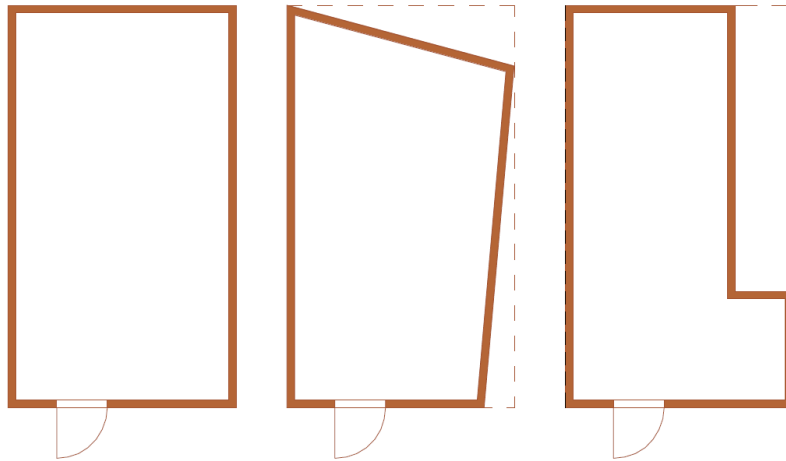
Diplomityön kirjoitusajankohtana uusi ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta oli vasta valmisteilla, joten ohjekortti laadittiin kirjoitusajankohtana voimassa olleiden palomääräysten mukaan. Ohjekorttia on kuitenkin mahdollista myöhemmin päivittää uusien määräysten mukaiseksi.

5.6 Ohje 6: Tilaelementin koko ja muoto

Tilaelementin muodon ja sopivan koon valintaa määrittävät arkkitehtonisten asioiden lisäksi valmistuksen, kuljetuksen ja maksimipainon asettamat rajoitteet. Jotta arkkitehti pääsisi suunnittelussa alkuun, on hänellä oltava käsitys tilaelementin kokoluokasta. Tilaelementin koko ja muoto on ehkä keskeisin CLT-tilaelementtirakennuksen arkkitehtisuunnittelua määrittävä tekijä, joten se päätettiin erottaa omaksi luvukseen.

5.6.1 Tilaelementin muoto

Tilaelementin muotoa käsittelevässä kohdassa nähtiin tärkeäksi korostaa sitä, että suorakulmainen särmiö on kuljetuksen, käsittelyn ja valmistuksen kannalta helpoin perusmuoto. Muita vaihtoehtoja ei kuitenkaan haluttu rajata kokonaan pois, vaan ohjeessa päätettiin esitellä myös muita mahdollisuuksia tilaelementin muodolle. Kustannusvaikutukset huomioon ottaen tilaelementin muotoa voidaan varioida, mutta sen äärimittojen tulee täyttää valmistuksen ja kuljetuksen asettamat ehdot.

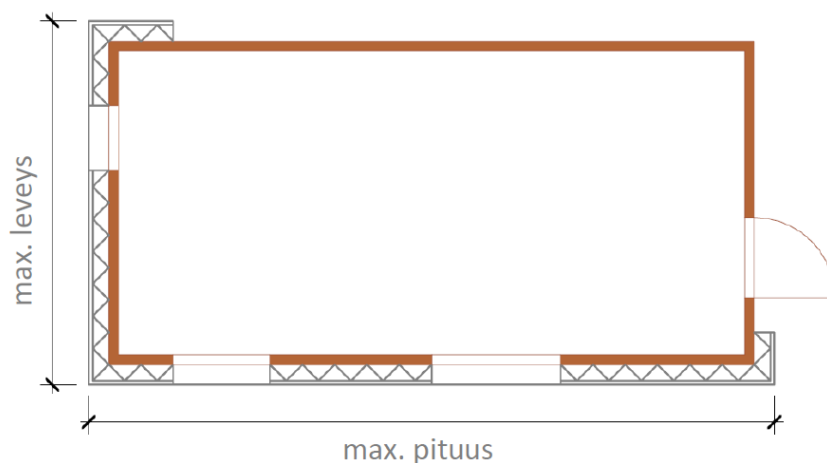


Kuva 5.1. Tilaelementin pohjamuodon variointi.

Tilaelementin muodon erilaisia variaatioita havainnollistettiin kuvan 5.1 avulla. Kuviin piirrettiin ovet havainnollistamaan sitä, että kyseessä on pohjapiirros. Katkoviivalla näytettiin, että suorakaiteesta poikkeavan muodon tulee mahtua kuljetuksen ja valmistuksen aiheuttamien mittarajojen sisäpuolelle. Tekstiin lisättiin myös huomio siitä, että pohjamuodossa olevat ulokkeet voivat hankaloittaa tilaelementin nostoa.

5.6.2 Valmistuksen mittarajoitteet

Valmistuksen aiheuttamat mittarajoitteet ovat valmistajakohtaisia, joten suunnitteluohjeeseen pyrittiin saamaan konkreettisuutta kysymällä kahdelta Suomessa CLT-tilaelementtejä valmistavalta tehtaalta heidän käyttämänsä maksimikoot. Samaan yhteyteen lisättiin kuitenkin huomio siitä, että maksimimittaisten tilaelementtien käyttäminen ei yleensä ole kuljetuksen kannalta taloudellisin ratkaisu.



Kuva 5.2. Tilaelementin maksimimittoja havainnollistava kuva.

Tilaelementtien valmistajakohtaiset maksimileveydet, -pituudet, -korkeudet ja -painot koottiin taulukkomuotoon. Tuotantolinjan fyysisten rajoitteiden lisäksi tilaelementin mittoihin vaikuttavat myös käytettävän CLT-levyn valmistusmitat. Kuvan 5.2 avulla havainnollistettiin, että tilaelementin ulkomittoihin vaikuttavat myös ulkoseinien eriste- ja verhouskerrokset, joten hyödynnettäväksi jäävät sisätilan mitat ovat rakennepaksuuksien verran pienempiä kuin tilaelementin ulkomitat.

5.6.3 Kuljetuksen mittarajoitteet

Tilaelementtien kuljetuksessa keskeinen kustannuksiin vaikuttava tekijä on se, kuinka raskaat varoitustoimenpiteet kuljetus vaatii. Luvussa 3.6.1 todettiin, että varoitustoimenpiteet määräytyvät käytännössä aina tilaelementin leveyden mukaan. Kuljetukseen liittyvistä monista mittarajoitteista suodatettiin siis ohjekorttiin ainoastaan olennainen informaatio eli tilaelementin leveyden vaikutus varoitustoimenpiteiden raskauteen. Näin suunnittelija säästyy luonnossuunnitteluvaiheessa monimutkaisten kuljetusrajoitteita käsittelevien taulukoiden tulkitsemiselta.

5.6.4 Tilaelementin paino

Yksi tilaelementin kokoa rajoittava tekijä on sen paino. Ohjekorttia varten muodostettiin laskukaavat, joiden avulla tilaelementin painoa voidaan alustavasti arvioida jo luonnossuunnitteluvaiheessa. Tilaelementtien painon jakautumista tarkasteltaessa huomattiin, että huonemoduulien painosta noin 10 % tulee kattorakenteen painosta ja loppuosa jakautuu varsin tasan lattian ja seinien välillä. Tekniikkamoduulin painosta noin puolet tulee lattiarakenteen ja märkätilaelementin yhteenlasketusta painosta, noin 40 % seinärakenteiden painosta ja noin 10 % kattorakenteen painosta. Painon jakautuminen seinä-, katto- ja lattiarakenteen sekä märkätilaelementin välillä riippuu kuitenkin tilaelementin mittasuhteista, käytettävistä rakennetyypeistä sekä märkätilaelementin koosta.

Erilaisten tilaelementtien painoa arvioitiin laskemalla eri rakennetyyppien painoja neliometriä kohti. CLT-levyn paksuudella on olennainen vaikutus rakenteen painoon erityisesti tilaelementin lattiarakenteessa, joten se on syytä ottaa laskennassa huomioon. Alla olevaan taulukkoon 5.1 on koottu eri rakennetyypeille lasketut painot. Märkätilaelementin painoksi arvioitiin kohdeaineiston perusteella 450 kg/m^2 . Lattiarakenteen painossa on huomioitu kalusteiden ja kevyiden väliseinien paino 15 kg/m^2 .

Taulukko 5.1. Tilaelementtien erilaisten rakennetyyppien painoja.

Rakennetyyppi	Kantava rakenne	Laskettu paino		Pyöristetty paino	
Lattia	CLT 100 mm	159,0	kg/m ²	160	kg/m ²
Lattia	CLT 120 mm	169,0	kg/m ²	170	kg/m ²
Lattia	CLT 140 mm	179,0	kg/m ²	180	kg/m ²
Lattia	CLT 160 mm	189,0	kg/m ²	190	kg/m ²
Lattia	CLT 180 mm	199,0	kg/m ²	200	kg/m ²
Lattia	palkkirakenteinen	140,7	kg/m ²	140	kg/m ²
Katto	CLT 80 mm	54,8	kg/m ²	50	kg/m ²
Märkätila		450	kg/m ²	450	kg/m ²
Huoneistojen väliset väliseinät	CLT 100 mm	80,3	kg/m ²	80	kg/m ²
Muut CLT-väliseinät	CLT 100 mm	74,8	kg/m ²		
Ulkoseinät	CLT 100 mm	104,6	kg/m ²		
Huoneistojen väliset väliseinät	CLT 120 mm	90,3	kg/m ²	90	kg/m ²
Muut CLT-väliseinät	CLT 120 mm	84,8	kg/m ²		
Ulkoseinät	CLT 120 mm	114,6	kg/m ²		

Seinärakenteiden painon arvioiminen on monimutkaisinta, sillä ulkoseinien, huoneistojen välisten seinien ja huoneistojen sisäisten seinien rakennetyyppien välillä on varsin suuret painoerot ja lisäksi tulisi huomioida myös aukotus. Jotta painon alustava arvioiminen olisi mahdollisimman yksinkertaista ja helppoa, ei pitäisi edellyttää aukkojen ja erilaisten seinätyyppien tarkkaa huomioimista laskennassa. Tilaelementtien painoja tarkasteltaessa kuitenkin havaittiin, että vaikka ulkoseinän rakennetyyppi on painavampi, niin laajempi aukotus keventää ulkoseinää sen verran, että painoerot muihin seiniin nähden tasoittuvat. Aukotuksen vaikutusta arvioitiin laskemalla toteutetuista kohteista otettujen esimerkkitalaelementtien seinärakenteiden keskimääräisiä painoja. Seinärakenteiden painoissa on huomioitu aukotukset sekä ikkunoiden ja ovien painot (50 kg/m²). Ulkoseinien osuus ja aukotuksen määrä vaihtelee eri tilaelementtien välillä, mutta kun laskettiin tilaelementtiä ympäröivien seinien painon keskiarvo, saatiin seuraavat keskimääräiset painot:

Taulukko 5.2. Seinärakenteiden keskimääräisiä painoja eräiden toteutettujen kohteiden tilaelementeissä.

Tilaelementin seinärakenteiden keskimääräisiä laskennallisia painoja	Tekniikkamoduuli	Huonemoduuli
Asunto 1	77 kg/m ²	82 kg/m ²
Asunto 2	77 kg/m ²	83 kg/m ²
Asunto 3	87 kg/m ²	80 kg/m ²
Asunto 4	64 kg/m ²	80 kg/m ²
Asunto 5	77 kg/m ²	-

Tuloksista voidaan päätellä, että tilaelementtiä ympäröivän seinärakenteen keskimääräinen paino asettuu aukotuksista ja erilaisista rakennetyypeistä huolimatta yleensä lähelle arvoa 80 kg/m². Tämä tulos saatiin tilaelementeille, joiden seinissä on käytetty 100 mm paksua CLT:tä. Kun CLT-seinän paksuutta kasvatetaan 20 mm, seinärakenteen paino kasvaa noin 10 kg/m². Hyvänä yleispätevänä arviona 120 mm paksujen tilaelementtiseinien keskimääräiselle painolle voidaan siis pitää 90 kg/m². Kun käytetään painon arvioinnissa näitä keskimääräisiä painoja, ei tarvitse huomioida väliseinien ja ulkoseinien erilaisia rakennetyyppejä eikä aukotuksen vaikutusta, jolloin laskukaavasta saadaan helposti käytettävä.

Taulukossa 5.3 on esitetty tilaelementin painon arvioimiseen muodostetut laskukaavat. Eri lattia-CLT:n ja seinä-CLT:n paksuuksille annettiin eri kaavat, sillä paksuuksien huomioimatta jättäminen aiheuttaisi tuloksiin huomattavia vaihteluja. Laskukaavoissa katon paino 50 kg/m² on lisätty märkätilojen ja kuivien tilojen neliöpainoihin.

Taulukko 5.3. Suuntaa antavat laskukaavat tilaelementtien kokonaispainojen arvioimiseen.

	CLT-seinät 100 mm	CLT-seinät 120 mm
CLT-lattia 100 mm	$K \cdot (160 + 50) \text{ kg/m}^2$ $+ M \cdot (450 + 50) \text{ kg/m}^2$ $+ S \cdot H \cdot 80 \text{ kg/m}^2$	$K \cdot (160 + 50) \text{ kg/m}^2$ $+ M \cdot (450 + 50) \text{ kg/m}^2$ $+ S \cdot H \cdot 90 \text{ kg/m}^2$
CLT-lattia 120 mm	$K \cdot (170 + 50) \text{ kg/m}^2$ $+ M \cdot (450 + 50) \text{ kg/m}^2$ $+ S \cdot H \cdot 80 \text{ kg/m}^2$	$K \cdot (170 + 50) \text{ kg/m}^2$ $+ M \cdot (450 + 50) \text{ kg/m}^2$ $+ S \cdot H \cdot 90 \text{ kg/m}^2$
CLT-lattia 140 mm	$K \cdot (180 + 50) \text{ kg/m}^2$ $+ M \cdot (450 + 50) \text{ kg/m}^2$ $+ S \cdot H \cdot 80 \text{ kg/m}^2$	$K \cdot (180 + 50) \text{ kg/m}^2$ $+ M \cdot (450 + 50) \text{ kg/m}^2$ $+ S \cdot H \cdot 90 \text{ kg/m}^2$
CLT-lattia 160 mm	$K \cdot (190 + 50) \text{ kg/m}^2$ $+ M \cdot (450 + 50) \text{ kg/m}^2$ $+ S \cdot H \cdot 80 \text{ kg/m}^2$	$K \cdot (190 + 50) \text{ kg/m}^2$ $+ M \cdot (450 + 50) \text{ kg/m}^2$ $+ S \cdot H \cdot 90 \text{ kg/m}^2$
CLT-lattia 180 mm	$K \cdot (200 + 50) \text{ kg/m}^2$ $+ M \cdot (450 + 50) \text{ kg/m}^2$ $+ S \cdot H \cdot 80 \text{ kg/m}^2$	$K \cdot (200 + 50) \text{ kg/m}^2$ $+ M \cdot (450 + 50) \text{ kg/m}^2$ $+ S \cdot H \cdot 90 \text{ kg/m}^2$
Palkkilattia	$K \cdot (140 + 50) \text{ kg/m}^2$ $+ M \cdot (450 + 50) \text{ kg/m}^2$ $+ S \cdot H \cdot 80 \text{ kg/m}^2$	$K \cdot (140 + 50) \text{ kg/m}^2$ $+ M \cdot (450 + 50) \text{ kg/m}^2$ $+ S \cdot H \cdot 90 \text{ kg/m}^2$

K = Kuivien tilojen pinta-ala seinien sisäpinnasta

M = Märkätilojen pinta-ala

S = CLT-seinien yhteenlaskettu pituus seinien sisäpinnasta, aukot mukaan lukien

H = Kerrokorkeus

Koska arkkitehtisuunnittelun luonnosvaiheessa ei ole vielä tietoa siitä, minkä paksuinen CLT-lattia tilaelementtiin tarvitaan, päätettiin taulukkoon lisätä vielä arviot siitä, kuinka paksu CLT-lattia tarvitaan minkäkin levyisessä tilaelementissä. Lattia-CLT:n paksuus riippuu sen jännevälistä ja mitoittavaksi tekijäksi tulee käytännössä aina kävelyn aiheuttama värähtely. CLT-lattian paksuutta eri jänneväleillä arvioitiin diplomityön kohdassa 3.1.3 esitetyillä periaatteilla ja tulokset on esitetty taulukossa 5.4.

Taulukko 5.4. CLT-lattian paksuuden arviointia eri jänneväleillä värähtelymitoituksen mukaan.

CLT-lattian paksuus	Tilaelementin lyhyemmän sivun maksimisisämitta		Suuntaa antava sisämitan arvo
	4 sivulta tuettu	2 sivulta tuettu	
100 mm	n. 3,0 m	n. 2,8 m	n. 3,0 m
120 mm	n. 3,8 m	n. 3,2 m	n. 3,5 m
140 mm	n. 4,3 m	n. 3,8 m	n. 4,0 m
160 mm	n. 4,8 m	n. 4,4 m	n. 4,5 m
180 mm	n. 5,0 m	n. 4,7 m	n. 5,0 m

Laatta mitoitettiin sekä kahdelta että neljältä sivulta tuettuna ja laskenta tehtiin sekä Stora Enson että CrossLamin vakiolevyillä. Laskennassa käytettiin oletuksena, että CLT-levyn lisäksi laatalle on omaa painoa 1 kN/m^2 (40 mm:n lattiavalu ja eristeet) ja laatan pidemmän sivun sisämitta on 12 m. Ohjekorttia varten tulokset pyöristettiin suuntaa antaviksi arvoiksi.

5.7 Ohje 7: Asuntopohjien muodostaminen

Ohjekortin seitsemännessä luvussa käsitellään yksittäisten asuntojen pohjapiirrosten muodostamista. Diplomityön luvussa 4.2 keskeisiksi asuntosuunnittelua määrittäviksi tekijöiksi nousivat tilaelementtien mittamaailma, tilaelementtijaon ja toistuvuuden merkitys sekä tilojen sijoittelu talotekniikan näkökulmasta. Koska tilaelementtien mittamaailma nostettiin omaksi aiheekseen ohjekortin luvussa 6, päätettiin tässä kohdassa keskittyä asuntopohjien muodostamiseen tilaelementtijaon sekä talotekniikan näkökulmasta.

5.7.1 Tilaelementtijako

Tilaelementtijaolla tarkoitetaan sitä, kuinka moneen tilaelementtiin asunnot ja kerros-pohja on jaettu, mikä on tilayksiköiden koko ja kuinka paljon niissä on toistuvuutta. Onnistunut tilaelementtijako on yksi keskeisimmistä kustannustehokkaaseen toteutettavuuteen vaikuttavista tekijöistä, jonka arkkitehti ratkaisee jo luonnossuunnitteluvaiheessa. Siksi sille päätettiin antaa ohjekortissa suuri painoarvo. Tilaelementtijakoa käsittelevä kohta pohjautuu diplomityön luvun 4.2.2 periaatteisiin. Tässä kohdassa haluttiin tähdentää erityisesti haastattelujen pohjalta muodostettua tilaelementtijaon perusperiaatetta:

”Rakennus kootaan mahdollisimman pienestä kappalemäärästä mahdollisimman samanlaisia komponentteja, joita on helppo kuljettaa ja käsitellä.”

Tätä periaatetta avataan tekstissä korostamalla, kuinka tärkeää on määrittää tilaelementin sopiva maksimikoko, minimoida tilaelementtien kappalemäärä sekä maksimoida

tilaelementtien toistuvuus. Jotta asia tulisi ymmärretyksi, sen tueksi annetaan myös käytännönläheisiä perusteluja. Tilaelementtitekniikan käyttäminen ei ole taloudellisesti mielekäästä, jos sarjatuotannon mahdollisuudet jätetään hyödyntämättä tai asuntojen jakaminen liian moneen tilaelementtiin aiheuttaa ylimääräisiä suunnittelu-, nosto- ja kuljetuskustannuksia.

5.7.2 Asumuksen muodostaminen kahdesta tilaelementistä

Tilaelementtijaon jälkeen ohjekortissa esitellään eri tapoja yhdistää kaksi tilaelementtiä yhdeksi asunnoksi. Tähän tarkoitukseen parhaaksi välineeksi valikoituivat esimerkkipohjapiirrokset. Esimerkkipohjapiirroksiin sisällytettiin samaan kuvaan useita erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja. Kuvissa esitetään periaatteen tasolla kolme erilaista tapaa

- yhdistää kaksi tilaelementtiä toisiinsa
- sijoittaa asunnon sisäänkäynti sekä
- toteuttaa tilaelementtikerrostalon parveke.

Lisäksi esimerkkipohjapiirrosten tavoitteena on välittää ideoita suunnittelutyöhön esittelemällä erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja, joilla ohjekortissa annetut reunaehdot pystytään täyttämään.

Kuvien yhteydessä esitellään myös tekniikkamoduulin ja huonemoduulin käsitteet. Eri-tyyppisten tilaelementtien erottelamisen tarkoituksena on ohjata keskittämään talotekniikka porrashuoneen yhteydessä sijaitsevaan tekniikkamoduuliin. Tekniikkamoduulista ja huonemoduulista käytetään usein nimityksiä märkämoduuli ja kuivamoduuli tai märkälohko ja kuivalohko. Ohjeessa haluttiin kuitenkin käyttää vastaavia termejä kuin Stora Enson (2016a) tilaelementtijärjestelmän käsikirjassa (engl. 'technical module' ja 'room module'). Tekniikkamoduuli nähtiin parempana terminä kuin märkämoduuli, sillä se vie ajatukset talotekniikan keskittämiseen eikä niinkään kosteusasioihin.

5.7.3 Talotekniikka

Suunnitteluohjeiden muodostamisessa päädyttiin siihen, että arkkitehtisuunnittelun luonnosvaiheeseen tähtäävässä ohjekortissa ei ole tarkoituksenmukaista esitellä CLT-tilaelementtikerrostalon taloteknisiä järjestelmiä sen syvällisemmin kuin mitä näytettiin tilaelementin rakennetta esittelevässä havainnekuvassa. Sen sijaan päätettiin keskittyä sellaisiin tilojen sijoitteluun ja tilavarauksiin liittyviin taloteknisiin asioihin, jotka arkkitehti ratkaisee luonnossuunnitteluvaiheessa ja joiden muuttaminen voi myöhemmässä suunnittelun vaiheessa olla vaikeaa. Näitä ovat erityisesti märkätilojen ja keittiön sijainti sekä hormien sijoittelu ja tilavaraukset.

Talotekniikkaan liittyen päätettiin antaa seuraavat ohjeistukset:

- Hormien sijoittamisperiaate ja tilavaraukset
- Kylpyhuoneen sijoittamisperiaate: yksi vaihtoehto
- Keittiön sijoittamisperiaate: kolme vaihtoehtoa

Talotekniikan osalta jouduttiin pohtimaan paljon sitä, kuinka tiukkoja rajoitteita arkkitehtuurille voidaan asettaa. Märkätilojen ja keittiön sijoittelun rajoittaminen luovat merkittäviä reunaehdoja asuntopohjiin. Toisaalta kyse on kustannustehokkaan toteutettavuuden kannalta niin keskeisistä periaatteista, että vaihtoehtojen rajoittaminen nähtiin ohjekortissa tarpeellisena.

Kuten diplomityön luvussa 4.2.3 perusteltiin, tulisi kaikki talotekniikan pystynousut sijoittaa porrashuoneen puolelle ja huoneistojen sisäisiä hormoneja tulisi välttää. Hormien sijoittaminen porrashuoneen reunoille päätettiin esitellä ohjekortissa ainoana vaihtoehtona, sillä sen todettiin olevan merkittävä tekijä korkean esivalmistusasteen ja tilaelementtitekniikan käytön järkevyyden kannalta. Ohjekortissa lainattiin RunkoPES-puuelementtistandardin yhteydessä esitellyn mallikerrostalon (PUUSTA Innovations 2014) ideaa, jossa porrashuoneen reunoille on tehty tilavaraus hormivyohtykkeelle. Ajatus hormivyohtykkeestä on luonnossuunnittelun kannalta toimiva, sillä se auttaa tekemään porrashuoneeseen reunoille riittävät tilavaraukset talotekniikalle, mutta hormien tarkkoja sijainteja ja kokoja ei tarvitse vielä määrittää. Kohdeaineiston piirustusten perusteella päädyttiin siihen, että 300 mm:n hormivyohtykkeen pitäisi olla riittävä useimmissa tapauksissa.

Märkätilojen sijoittamiselle päätettiin antaa vain yksi vaihtoehto, eli märkätila tulee sijoittaa porrashuoneen vastaiselle seinälle suoraan hormin yhteyteen. Keittiön sijoittamisen suhteen ei otettu yhtä tiukkaa linjaa, vaan keittiön viemärireitille esitettiin kolme erilaista vaihtoehtoa:

- keittiön viemäri yhdistetään suoraan seinä läpi porraskäytävän hormiin
- keittiön viemäri viedään porraskäytävän hormiin märkätilaelementin rakenteissa tai
- keittiön viemäri viedään porraskäytävän hormiin kiintokalusteiden sokkeleissa.

Ohjeessa päädyttiin myös suosittelemaan keittiön sijoittamista ensisijaisesti tekniikka-moduulin puolelle, mutta mainittiin kuitenkin myös, että arkkitehtonisen ratkaisun vaatiessa keittiö on kuitenkin mahdollista sijoittaa myös huonemoduulin puolelle, jos siitä aiheutuvat kustannukset ovat hyväksyttäviä ja viemäri pystytään viemään hormiin riittävän lyhyttä reittiä lattian yläpuolisena asennuksena. Vaihtoehtojen havainnollistamiseen käytettiin esimerkikerrostalon pohjapiirrosta, jonka asunnoissa keittiön viemärireitit on ratkaistu eri tavoilla. Samassa kuvassa havainnollistettiin myös kylpyhuoneen sijoittaminen porraskäytävän yhteyteen sekä 300 mm:n hormivyohtykkeen ajatus.

5.8 Ohje 8: Kerrospohjan muodostaminen

Ohjekortin kahdeksas luku keskittyy erityisesti rakennuksen jäykistyksen huomioimiseen kerrospohjassa. Tämän luvun yhtenä haasteena on se, että ohjekortin kohderyhmällä ei välttämättä ole tietoa, mitä rakennuksen jäykistyksellä tarkoitetaan. Luvun johdannossa koettiin tarpeelliseksi selittää kansantajuisesti, mihin rakennuksen jäykistyksellä pyritään ja miksi se on erityisen haastavaa juuri CLT-tilaelementtikerrostalossa.

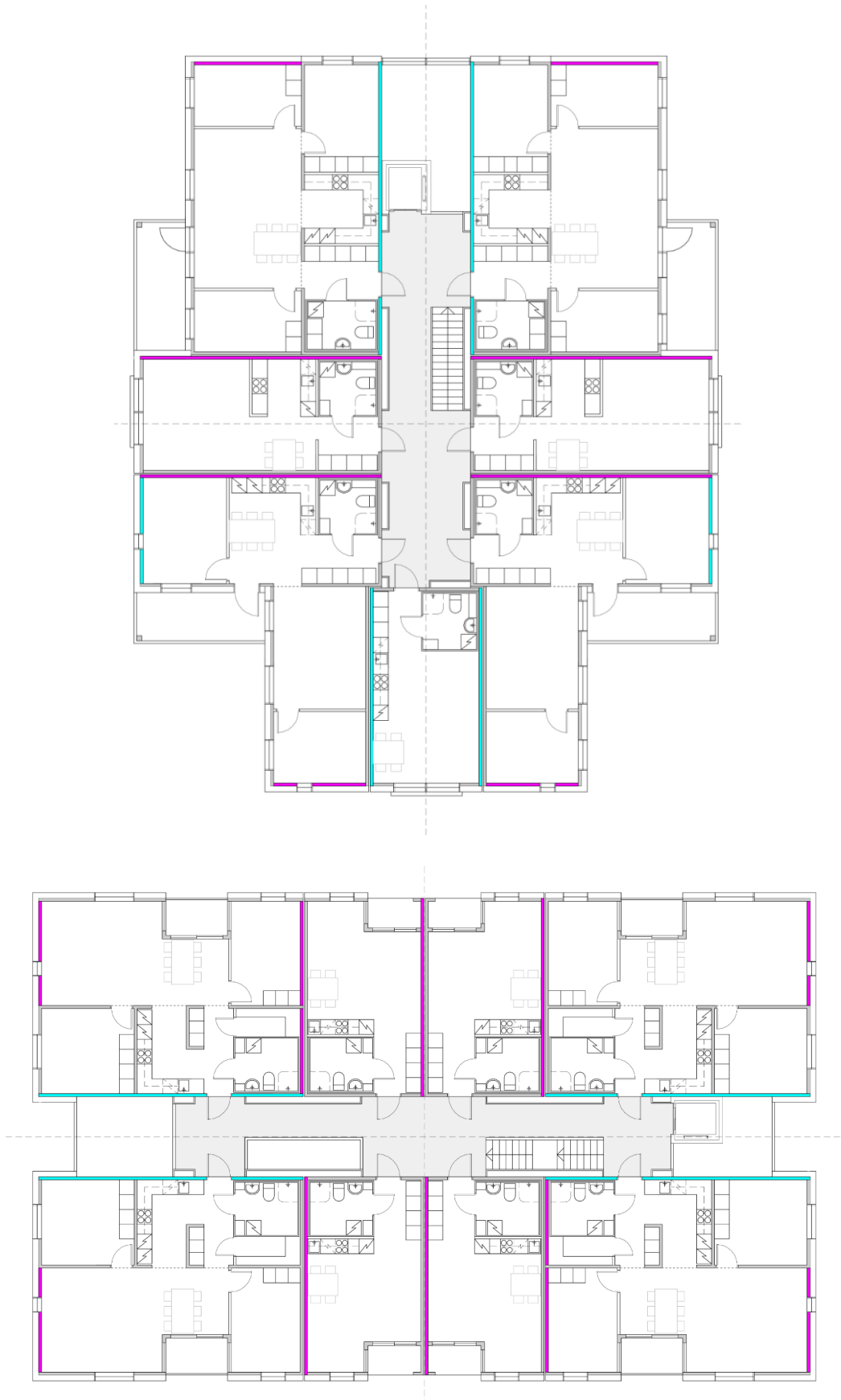
Diplomityön edetessä tultiin siihen tulokseen, että yleispäteviä suunnitteluohjeita jäykistävän rungon geometrian muodostamiseen on hyvin vaikeaa määrittää laskennallisesti, sillä erilaisten kerrospohjien variaatioita on rajattomasti. Sen sijaan toimivammaksi tavaksi osoittautui jäykistävien seinien valinnan ja sijoittamisen periaatteiden esittelemisen muutamien esimerkkisuunnitelman avulla.

Jäykistävien seinien valinnan ja sijoittelun periaatteet perustuvat diplomityön lukuun 3.4.1. Suunnitteluohje lähtee siitä, millaisia seiniä voidaan valita jäykistäviksi seiniksi. Erilaisten seinien jäykistysominaisuuksia havainnollistettiin ohjeessa jakamalla ne tyyppeihin A ja B. Tyypin A seinät ovat jäykistykseen paremmin soveltuvia ja niitä pitäisi valita ensisijaisesti. Tyyppiin A kuuluvat tilaelementin pidemmän sivun seinät, joissa ei ole aukkoja tai joissa on vain yksi oviaukko. Tyypin A seiniä voidaan täydentää tyypin B seinillä, joihin kuuluvat vähintään noin 4 metriä pitkät muut umpinaiset seinäosuudet tai rajoitetusti aukotetut tilaelementin seinät.

Tyypin A ja B seinien sijoittelua kerrospohjassa havainnollistettiin ohjekortissa esimerkkipohjapiirrosten avulla. Sijoitteluohjeet muodostettiin siten, että ne ohjaisivat seuraavien periaatteiden toteutumiseen:

- pitkiä jäykistäviä seiniä on rakennuksen molemmissa pääsuunnissa
- jäykistäviä seiniä on riittävän paljon
- jäykistävät seinät asetellaan mahdollisimman symmetrisesti
- jäykistävissä seinissä on mahdollisimman vähän aukkoja ja
- jäykistäviä seiniä on myös lähellä rakennuksen ulkokehää.

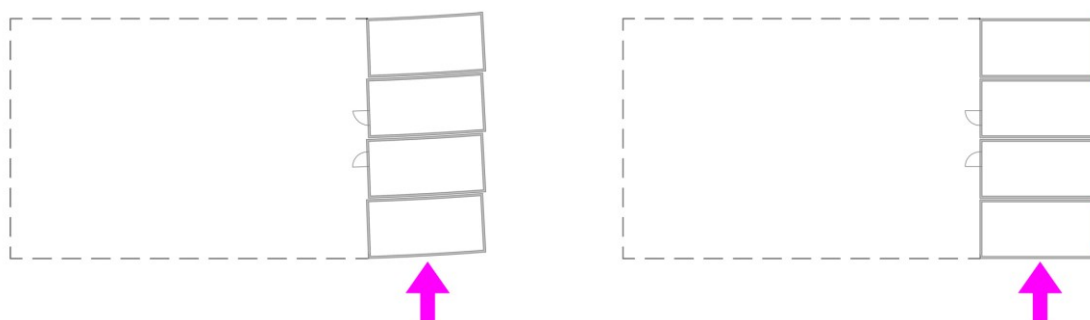
Esimerkkisuunnitelmien talotyypeiksi valittiin pistetalo ja keskikäytäväatalo, sillä diplomityön aineistona käytetyt kohteet edustivat pääasiassa näitä kahta tyyppiä ja on todennäköistä, että jatkossakin CLT-tilaelementtitekniikalla tullaan toteuttamaan vastaavan tyyppisiä kohteita. Ohjekuviin piirrettiin apuviivoiksi rakennuksen keskilinjat rakennuksen molemmissa pääsuunnissa, sillä ne havaittiin hyviksi apuvälineiksi jäykistävän rungon hahmottelemisessa. Keskilinjojen avulla pystyy erottamaan helpommin, kuinka symmetrisesti jäykistävät seinät sijoittuvat kerrospohjaan.



Kuva 5.4. Ohjekorttia varten laaditut esimerkisuunnitelmat. Jäykistävät seinät rakennuksen molemmissa pääsuunnissa on korostettu väreillä.

Esimerkkisuunnitelmien laatiminen tapahtui kokeilevasti. Monen yrityksen ja erehdyksen kautta alkoi hahmottua, millaisia tilanteita suunnittelussa tulee helposti vastaan. Jos rakennuksessa on vain yhdestä tilaelementistä koostuvia pienasuntoja, on kerrospohjassa luonnostaan paljon umpinaisia huoneistojen välisiä seiniä. Suurista asunnoista muodostuvassa kerrospohjassa on puolestaan vähemmän huoneistojen välisiä umpiseiniä, jolloin mahdollisuuksia jäykistävien seinien valinnalle on vähemmän. Lisäksi suuret, kahdesta tilaelementistä koostuvat asunnot sijoittuvat hyvin usein rakennuksen kulmiin, jotta kaikille makuuhuoneille riittää ikkunaseiniä ja rungon keskelle sijoittuvien ikkunattomien aputilojen osuus ei kasva suhteettoman suureksi. Erityisesti suurissa kulma-asunnoissa tulisi järjestää umpinaisia jäykistäviä seiniä myös rakennuksen ulkokehälle, mikä tulee ottaa huomioon aukotuksen suunnittelussa.

Yksi suunnittelussa esiin tullut huomio oli myös se, että arkkitehtisuunnittelussa tulee helposti vastaan tilanne, jossa päädyssä on pelkästään samansuuntaisia tilaelementtejä rinnakkain. Tilannetta on havainnollistettu kuvassa 5.5. Tällaisessa tilanteessa vaakasuuntainen siirtymä kasvaa helposti suureksi ja rakennuksen pätyyn tulee järjestää jäykistäviä seiniä, jotka pitävät päädyn paikallaan. Tämä päätettiin nostaa ohjekortissa esiin erillisenä huomiona.



Kuva 5.5. Samansuuntaisten tilaelementtien siirtymä rakennuksen päädyssä ja jäykistävien seinien tarve.

Esimerkkikerrospohjien suunnittelussa nousi esiin myös se, että pitkiä jäykistäviä seiniä ei yleensä luonnostaan muodostu rakennuksen molempiin pääsuuntiin, vaan suunnitelmaan täytyy tietoisesti sisällyttää molemman suuntaisia tilaelementtejä. Tämä havainto vahvisti näkemystä siitä, että ohjekortissa on tärkeää ohjata suunnittelua siihen suuntaan, että tyypin A seiniä olisi rakennuksen molemmissa pääsuunnissa.

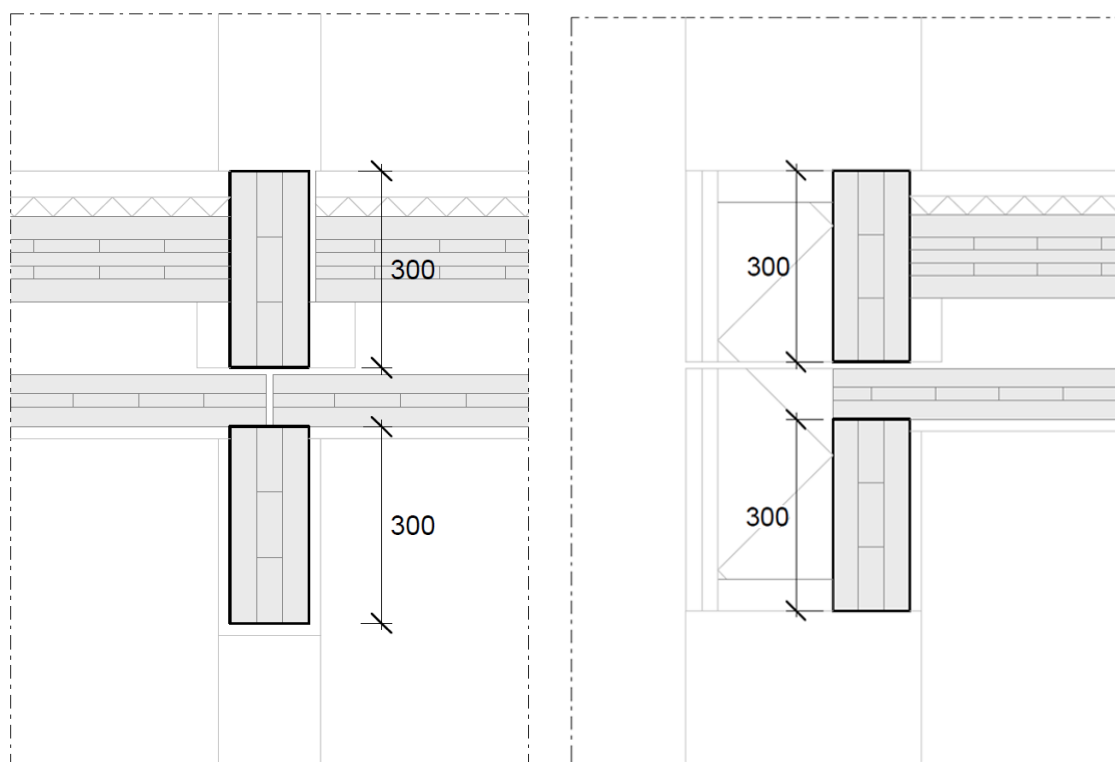
5.9 Ohje 9: Aukotus

Tilaelementin aukotuksen vaikutus rakennesuunnitteluun on mielenkiintoinen ja monitahoinen aihe. CLT-materiaali antaa mahdollisuuden työstää ja aukottaa levyjä mitä erilaisimpiin muotoihin. Arkkitehtuurin lisäksi aukotuksen koolla ja sijoittelulla on monenlaisia vaikutuksia rakenteen kestävyys. Aukotuksessa on huomioitava aukkojen

ylä- ja alapuolelle jäävien CLT-palkkien riittävä korkeus aukon kokoon nähden, aukkojen väliin jäävien seinäosuuksien kestävyys, jäykistävien seinien riittävä jäykkyys sekä aukkopalkkien kestävyys tilaelementin nostossa. Lisäksi aukkojen sijoittelussa tulee huomioida se, että tilaelementin nostopisteet on mahdollista sijoittaa tarkoituksenmukaisesti kohtiin.

5.9.1 Aukot kantavissa CLT-seinissä

Ulkoseinissä aukon yläreunan korkeus on yleensä parvekeoven korkeuden mukaisesti joko noin 2100 mm tai 2300 mm. Jos huonekorkeus on 2600 mm, jää ikkunan tai parvekeoven yläpuolelle 300 - 500 mm korkea CLT-palkki. Aukon alapuolelle jää vastaa- vasti vähintään lattiarakenteen korkuinen CLT-palkki, joka sekin on yleensä noin 300 mm korkea. Huoneiston sisäisessä väliseinässä aukon halutaan yleensä olevan vähintään 2200 mm korkea, jotta aukon viemä lattiapinta-ala voidaan laskea huoneiston neliöihin mukaan. Jos huonekorkeus on 2600 mm, voi yläpuolelle jäävä aukkopalkki olla enintään 400 mm korkea. Näiden huomioiden perusteella otettiin ohjeistuksen lähtökohdaksi se, että aukkojen ylä- ja alapuolelle on mahdollista jättää lähes joka tilanteessa ainakin 300 mm korkeat CLT-palkit. Aukkojen maksimileveyden määrittäminen tehtiin siis tälle aukkopalkin koolle.



Kuva 5.6. Huoneiston sisäisen seinän sekä ulkoseinän pystyleikkaus aukon kohdalta.

Taulukossa 5.5 on esitetty 300 mm korkean CLT-aukkopalkin käyttöasteet eri pituisilla jänneväleillä. Välipohjalta tulevat kuormat on jaettu päällekkäisille aukkopalkeille niiden jäykkyyksien suhteessa, eli tässä tapauksessa puoliksi ylemmän ja alemman aukkopalkin kesken. Aukkopalkki mitoitettiin diplomityön lukujen 3.2.1 ja 3.2.2 mukaisesti sahatavarapalkkina, jonka korkeus on aukkopalkin korkeus ja leveytenä huomioitiin ainoastaan vaakasuuntainen 40 mm leveä keskilamelli. Laskennassa oletettiin, että välipohjarakenteen CLT-laatat toimivat palkkien kiepahdustukina.

Taulukko 5.5. 300 mm korkean CLT-aukkopalkin käyttöasteet eri jänneväleillä.

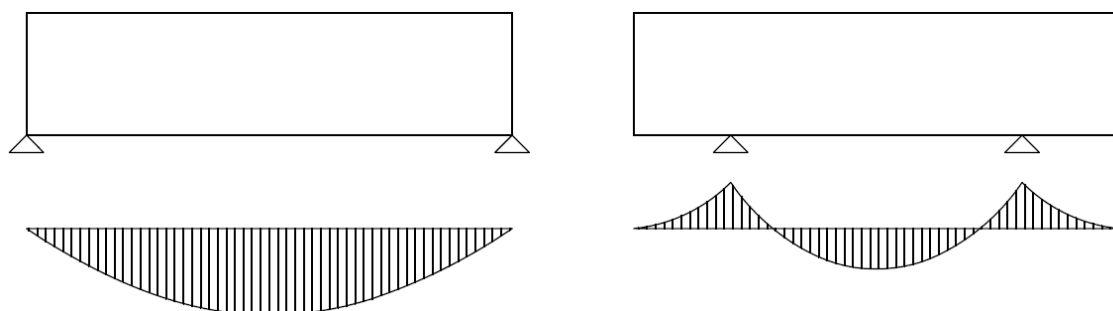
välipohjarakenteen paino	2,2 kN/m ²		
hyötykuorma	2,0 kN/m ²		
kuormitusleveys	4000 mm		
CLT-aukkopalkin leveys	120 mm (lamellit 40+40+40 mm)		
CLT-aukkopalkin korkeus	300 mm		
aukon leveys	2000 mm	2250 mm	2500 mm
taivutuksen käyttöaste	62,4 %	78,9 %	97,5 %
taipuman käyttöaste	38,1 %	54,3 %	74,5 %

Määrääväksi tuli murtorajatila keskipitkässä aikaluokassa. Taulukossa on esitetty vain taipuman ja taivutuksen käyttöasteet, sillä leikkauksen käyttöaste jäi hyvin pieneksi kaikissa tapauksissa. Taulukon oletusten mukaisella CLT-palkilla aukon maksimileveys on noin 2500 mm, kun otetaan huomioon vain pystykuormat. Tämä mitta mahdollistaa kohtuullisen kokoisen aukon tekemisen esimerkiksi sisäänvedetylle parvekkeelle tai keittiön ja ruokailutilan välille. Aukotusohjeessa päädyttiin siten ohjeistamaan kantavien CLT-seinien aukkojen maksimileveydeksi 2500 mm ja ylä- ja alapuolisten aukkopalkkien vähimmäiskorkeudeksi 300 mm.

5.9.2 Noston vaikutus tilaelementin aukotukseen

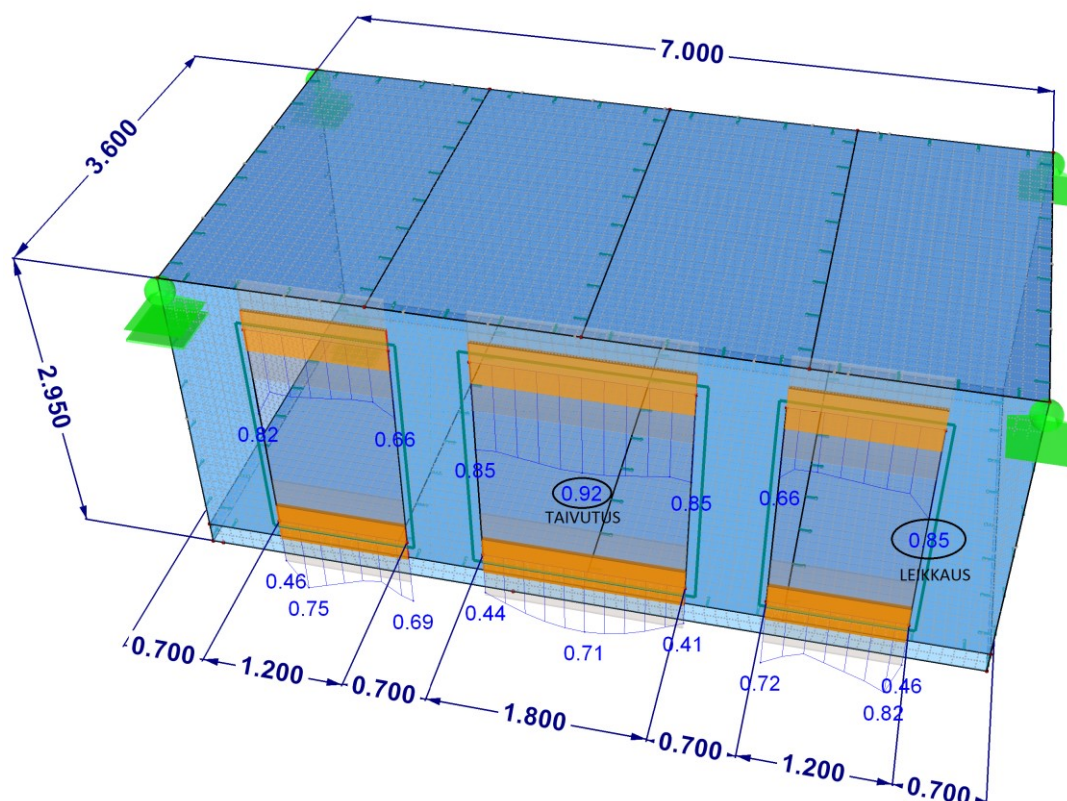
Tilaelementin tulee kestää noston aiheuttamat rasitukset. CLT:n keveys suhteessa sen lujuus- ja jäykkyysominaisuuksiin antaa tilaelementin nostettavuudelle erinomaiset lähtökohdat. Laajasti aukotetuissa tilaelementeissä tarvitaan kuitenkin huolellista tarkastelua erityisesti aukkojen ylä- ja alapuolisten aukkopalkkien kestävyys suhteen. Nostopisteitä ei tulisi sijoittaa aukkopalkkien kohdalle, vaan ehjän seinän kohdalle. Käytännön suunnittelutyössä haasteeksi on osoittautunut se, että arkkitehtisuunnitelman aukotus ei aina mahdollista nostopisteiden sijoittamista sopiviin kohtiin.

Noston aiheuttamat rasitukset tilaelementtiin ovat hyvin tapauskohtaisia ja ne riippuvat tilaelementin koosta ja painosta, aukkojen geometriasta sekä nostopisteiden sijainnista. Nostopisteiden toimivalle sijainnille ei voi antaa yleispätevää ohjetta, sillä se riippuu monesta eri tekijästä. Sellainen yleishavainto voitiin kuitenkin tehdä, että jos tilaelementin nostopisteet ovat hyvin kaukana toisistaan (esim. tilaelementin kulmissa), kasvaa taivutusrasitus tilaelementin keskivaiheilla suureksi. Taivutusrasitusta voidaan tasata siirtämällä nostopisteitä tilaelementin kulmista keskelle päin, jolloin tilaelementin päädyt jäävät ulokkeiksi nostopisteiden ulkopuolelle. Tilannetta on havainnollistettu kuvassa 5.7, jossa tilaelementti on yksinkertaistettu palkiksi. Lyhyet tai pitkiltä sivuiltaan umpinaiset tilaelementit voidaan yleensä nostaa nurkkapisteistään, mutta pidemmissä tilaelementeissä nostopisteitä olisi syytä siirtää kesemmälle. Kohdeaineiston rakennesuunnitelmista todettiin, että nostopisteet oli sijoitettu yleensä noin 3,5 – 7,5 metrin päähän toisistaan.



Kuva 5.7. Tilaelementtiin kohdistuvan taivutusrasituksen tasaaminen nostopisteitä siirtämällä.

Nostopisteiden siirtäminen muuttaa rasituksia siten, että nostopisteiden kohdalle tulee leikkausrasituksen lisäksi enemmän taivutusrasitusta. Nostopisteiden kohdalla vaikuttavien suurempien rasitusten vuoksi aukon reunan ei olisi hyvä olla kovin lähellä nostopistettä. Ohjekorttiin arvioitiin, että nostopisteiden ympärillä olisi hyvä olla ainakin 600 mm ehjää CLT-seinää. Tämä antaa myös hieman mahdollisuuksia hakea nostopisteille sopivaa kohtaa siirtelemällä.



Kuva 5.8. Noston vaikutusta aukkopalkkien kestävyys voidaan arvioida esim. RFEM-ohjelmalla muodostetulla mallilla. Kuvan aukkopalkit on mallinnettu Result beam -työkalulla, joka integroi pinnan sisäiset rasitukset palkin sisäisiksi rasituksiksi. Tämä mahdollistaa aukkopalkkien mitoittamisen sahatavarapoikkileikkauksina. Diagrammit kuvaavat palkkien maksimikäyttöastetta kussakin eri kohdassa määräävimmän mitoitus-tapauksen mukaan.

Ohjekortin kannalta tärkeäksi todettiin se, että arkkitehti saataisiin ylipäättään tietoiseksi siitä, että aukotus vaikuttaa nostopisteiden sijoittelumahdollisuuksiin. Lukuarvoista päätettiin ohjeistaa sen verran, että hyvät kohdat nostopisteille sijoittuvat yleensä nurkkapisteiden ja tilaelementin neljännespisteiden välimaastoon, kuitenkin siten, että nostopisteiden välinen etäisyys on noin 4-7 metriä. Mikäli nostopisteiden ohjeellista etäisyyttä toisistaan ei annettaisi, lukija saattaisi päätellä, että nostopisteet voidaan aina sijoittaa nurkkapisteisiin. Ohjeellinen etäisyys ohjaa huomioimaan varsinkin pidemmissä tilaelementeissä sen, että nostopisteet täytyy sijoittaa keskemälle tilaelementtiä. Kuvassa 5.8 on havainnollistettu, että 7 metriä pitkän, laajasti aukotetun tilaelementin nostaminen nurkista voi vielä olla mahdollista, mikäli aukotuksen geometria sattuu olemaan sopiva, mutta kovin paljon suuremmaksi nostopisteiden välistä etäisyyttä ei voi pitkältä sivultaan aukotetussa tilaelementissä kasvattaa.

5.9.3 Aukkojen etäisyys toisistaan

Kantavissa seinissä on huolehdittava siitä, että aukkojen väliin jää riittävän leveä osuus ehjää seinää, jonka kautta pystykuormat pystytään viemään perustuksille. Kantavat seinät mitoitetaan pystykuormien aiheuttamalle puristukselle, taivutukselle ja nurjahdukselle. Lisäksi jos CLT-kattolevy jää kerrosten väliin, voi kattolevyn leimapainekestävyys ylittyä. Pystykuormakestävyyden laskennassa tulee siis tarvittaessa huomioida kattolevyn poikittainen puristus.

Seinän pystykuormakestävyys laskettiin taulukon 5.6 mukaisilla tiedoilla. Palotilanteen tarkasteluissa kävi ilmi, että CLT-rakennetta suojaavan kipsilevyn murtumishetkellä t_f on olennainen vaikutus seinän kestävyteen palotilanteessa. Kuten diplomityön luvussa 3.3.3 todettiin, tietoja kokeellisesti määritetyistä murtumishetken arvoista on heikosti saatavilla F-tyypin palokipsilevyille. Tässä työssä murtumishetkelle on käytetty RIL:n puurakenteiden suunnitteluohjeen (RIL 2009b) antamaa arvoa $t_f = 50$ min. Tämä arvo annetaan tehollisen jäännöspoikkileikkauksen menetelmän (SFS-EN 1995-1-2 liite D) esittelyn yhteydessä seinärakenteelle, joka on suojattu 15 mm:n F-tyypin palokipsilevyllä. Muut arvot on määritetty Eurokoodin SFS-EN 1995-1-2 mukaan 18 mm:n palokipsilevyille.

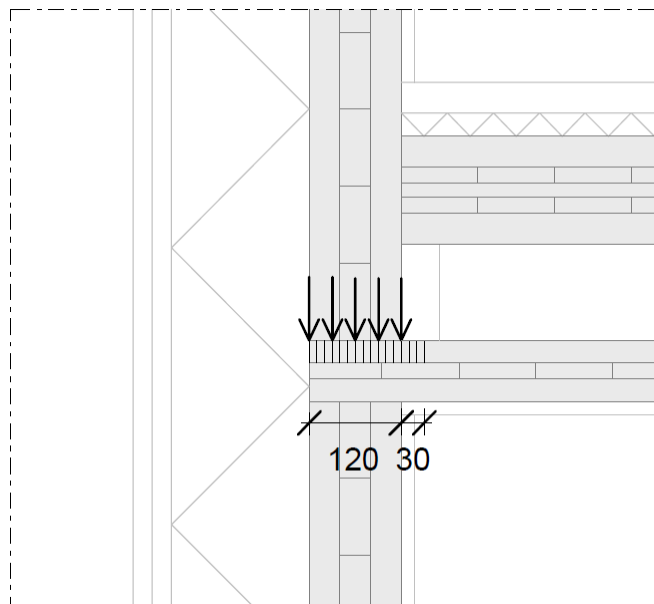
Taulukko 5.6. CLT-seinän pystykuormakestävyyden laskennassa käytettyjä arvoja.

Kantavana rakenteena 120 mm:n CLT-levy, lamellit 40 + 40 + 40 mm	
Suojaerhouksena 18 mm:n palokipsilevy (tyyppi F)	
Nurjahduspituus	$L_c = 3,2 \text{ m}$
Pystykuorman epäkeskeisyys	$e = 20 \text{ mm}$
Hiiltymisnopeus ensimmäiselle lamellille	$\beta_0 = 0,65 \text{ mm/min}$
Hiiltymisen alkamishetki suojaverhouksen takana	$t_{ch} = 36 \text{ min}$
Levyn murtumishetki	$t_f = 50 \text{ min}$

Seinä mitoitettiin kuten 1 metrin levyinen puupilari, mutta poikkileikkaussuureet määritettiin joustavasti kootun kerrospalkin teoriaan perustuvilla laskentakaavoilla, jotka on esitelty diplomityön luvussa 3.1.1. Kunkin mitoitustapauksen pystykuormakestävyys haettiin kokeilemalla erilaisia kuorman arvoja, kunnes löydettiin kuorma, jolla käyttöaste on juuri ja juuri alle 100 %. Tulokset pyöristettiin alaspäin tarkkuuteen 5 kN/m. Tulokseksi saadut pystykuormakestävyydet on esitetty taulukossa 5.8 mitoitustapauksittain.

Seinän pystykuormakestävyyden lisäksi laskettiin kattolevyn poikittainen puristuskestävyys. Kestävyyttä kasvatettiin tukipaineekertoimella, jossa tehollisen kosketuspinnan pituuteen lisättiin 30 mm kattolevyn syysuunnassa kuvan 5.9 mukaisesti. Pysyvässä

aikaluokassa kattolevyn poikittaiseksi puristuskestävyydeksi saatiin 225 kN/m ja keskipitkässä aikaluokassa 300 kN/m. Palotilanteessa kattolevyn puristuskestävyys ei tullut seinärakenteen pystykuormakestävyyden kannalta määrääväksi, joten kattolevyn puristuskestävyyden tarkastelua palotilanteessa ei ole tässä esitetty.



Kuva 5.9. Kattolevyn poikittainen puristus ja tehollisen kosketuspinnan pituuden lisääminen 30 mm:llä.

Kun seinän pystykuormakestävyys saatiin selville, arvioitiin, kuinka suuri kuorma voisi tulla CLT-tilaelementtikerrostalon alimmalle CLT-seinälle, kun talossa olevien CLT-kerrosten määrä on 4, 6 tai 8. Tilaelementtien välipohjan jänneväliksi valittiin 4,5 metriä, joka on lähellä tilaelementin tavanomaista maksimileveyttä. Taulukkoon 5.7 on koottu kuormien laskennassa käytetyt tiedot.

Taulukko 5.7. CLT-seinän kuormien laskennassa käytetyt arvot.

Seinärakenne	CLT 120 + GF18	1,0 kN/m ²
Lattiarakenne	CLT 160	2,2 kN/m ²
Kattorakenne	CLT 80	0,5 kN/m ²
Hyötykuorma		2 kN/m ²
Lumikuorma katolla		2 kN/m ²
Välipohjan jänneväli		4,5 m

Taulukko 5.8. Seinien ja kattolevyjen pystykuormakestävyydet ja kuormat sekä niiden perusteella lasketut seinän leveyden ja kuormitusleveyden suhteet. Määrittäviksi osoittautuneet tapaukset on korostettu taulukossa harmaalla.

PYSYVÄ AIKALUOKKA

	4 kerrosta	6 kerrosta	8 kerrosta
Alimman kerroksen seinän kuorma [kN/m]	51,5	77,6	94,0
Seinän pystykuormakestävyys [kN/m]	290	290	290
Seinän leveyden A suhde kuormitusleveyteen B	0,18	0,27	0,32

Alimman kerroksen kattolevyn kuorma [kN/m]	39,3	65,1	82,6
Kattolevyn pystykuormakestävyys [kN/m]	225	225	225
Seinän leveyden A suhde kuormitusleveyteen B	0,17	0,29	0,37

KESKIPITKÄ AIKALUOKKA

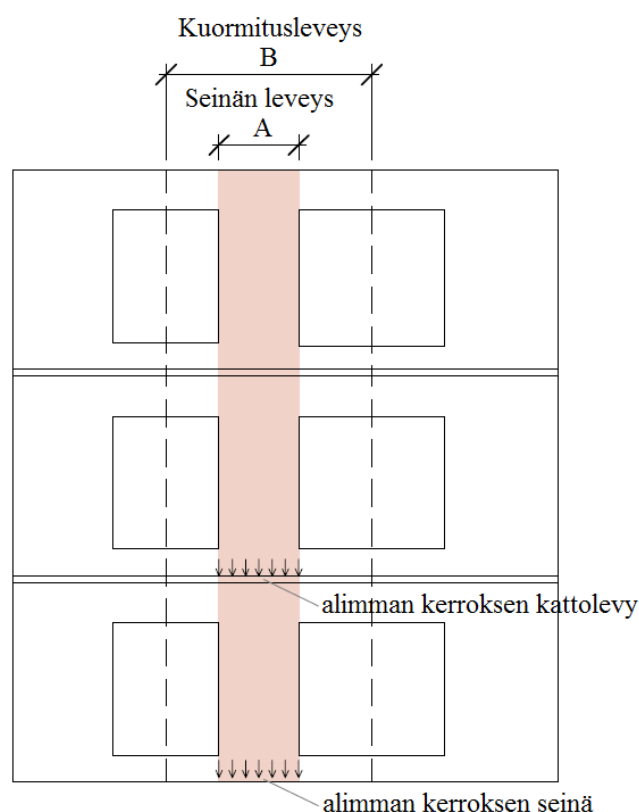
	4 kerrosta	6 kerrosta	8 kerrosta
Alimman kerroksen seinän kuorma [kN/m]	75,6	111,4	138,8
Seinän pystykuormakestävyys [kN/m]	385	385	385
Seinän leveyden A suhde kuormitusleveyteen B	0,20	0,29	0,36

Alimman kerroksen kattolevyn kuorma [kN/m]	58,4	93,9	122,3
Kattolevyn pystykuormakestävyys [kN/m]	300	300	300
Seinän leveyden A suhde kuormitusleveyteen B	0,19	0,31	0,41

PALOTILANNE

	4 kerrosta	6 kerrosta	8 kerrosta
Alimman kerroksen seinän kuorma [kN/m]	45,4	67,4	82,3
Seinän pystykuormakestävyys [kN/m]	315	315	315
Seinän leveyden A suhde kuormitusleveyteen B	0,14	0,21	0,26

Taulukon tiedoilla laskettiin alimman kerroksen seinälle tuleva viivakuorma sekä alimman kerroksen kattolevylle tuleva viivakuorma. Seinälle tulevan kuorman ja seinän pystykuormakestävyyden suhteesta saatiin selville, kuinka leveä aukkojen väliin jäävän seinäosuuden A tulisi olla suhteessa kuormitusleveyteen B.



Keskipitkä aikaluokka osoittautui kriittisimmäksi seinän kestävyys kannalta. Erilaisella kipsilevytyksellä ja erilaisella levyn murtumishetken t_f oletuksella myös palotilanne olisi voinut tulla määrääväksi. CLT-seinän palonkestävyyttä voidaan kuitenkin parantaa kipsilevytyksen lisäämisellä, joten aukkojen väliin jäävän seinäosuuden leveyden ohjeistaminen päätettiin tehdä keskipitkän aikaluokan mukaan.

Taulukko 5.9. Aukkojen väliin jäävän ehjän seinäosuuden leveys.

CLT-kerrosten lukumäärä Aukkojen väliin jäävän ehjän seinäosuuden leveys

3-4 kerrosta	0,20 * kuormitusleveys
5-6 kerrosta	0,30 * kuormitusleveys
7-8 kerrosta	0,40 * kuormitusleveys

Tarkastelun perusteella päädyttiin ohjeistamaan aukkojen väliin jäävän ehjän seinäosuuden leveys taulukon 5.9 mukaisilla laskukaavoilla. Yksinkertaisuuden vuoksi kerroimet pyöristettiin tasalukemiin. Useimmiten tilaelementit ovat kapeampia kuin 4,5 metriä, joten kertoimia pyöristettiin mieluummin alaspäin, jotta luonnossuunnitteluvaiheeseen tarkoitettu ohjeistus ei asettaisi liian tiukkoja rajoja rakennuksen arkkitehtuurille. Kertoimien on tarkoitus olla suuntaa antavia arvioita, jotka pätevät useimmissa tavanomaisissa tapauksissa ja helpottavat siten rakenne- ja arkkitehtisuunnittelun yhteensovittamista.

5.9.4 Aukot jäykistävässä CLT-seinissä

Jäykistävien CLT-seinien sallitun aukotuksen määrittäminen on vaikea aihe. Tietävästi ei ole olemassa suunnitteluohjetta, jonka avulla aukotetun CLT-seinän jäykistyskapasiteettia voitaisiin yksinkertaisella ja luotettavalla tavalla arvioida, joten aukotetun seinän jäykistyslaskenta johtaa työläisiin ja vaikeisiin analyysihin. Koska CLT-tilaelementtikerrostalossa jäykistäviä seiniä on lähes välttämätöntä sijoittaa myös rakennuksen ulkokehälle, on jäykistävien seinien aukottamisen mahdollisuus arkkitehtuurin kannalta kuitenkin hyvin tärkeää.

Jäykistävien seinien aukotuksesta päätettiin esittää ohjeessa vain suuntaa antavat peruseriaatteen. Merkittävää on se, kestäkö aukon ympärille jäävä CLT-kehä sille aiheutuvat rasitukset. Aukon olisi syytä sijaita mahdollisimman keskellä seinää, jotta sen ylä- ja alapuolelle sekä sivuille jää mahdollisimman leveät umpiseinäosuudet. Kuten kohdassa 5.9.1 todettiin, on ikkunan yläpuolelle mahdollista saada ainakin 500 mm:n aukkopalkki. Tämän perusteella päätettiin ohjeistaa, että myös aukon alapuolelle ja sivuille pitäisi jäädä vähintään 500 mm ehjää CLT-seinää, jotta muut aukon ympärille jäävät CLT-osuudet eivät olisi ainakaan heikompia kuin aukon yläpuolelle jäävä palkki. Aukkojen

lukumäärä päätettiin rajata lyhyissä seinissä yhteen ja pitkissä seinissä kahteen aukkoon, joiden koko on enintään noin 1,5 - 2 m².

5.10 Ohje 10: Julkisivut

Ohjekortin viimeisen luvun aiheena on puujulkisivujen suunnittelu. Julkisivujen suunnittelun nostaminen osaksi ohjekorttia katsottiin aiheelliseksi, sillä tilaelementtien väliset saumat vaikuttavat ratkaisevasti rakennuksen yleisilmeeseen, eikä niiden merkitystä voi ohittaa luonnossuunnitteluvaiheessa. Aihe nähtiin tärkeäksi myös siksi, että puukerrostalon julkisivun suunnittelu poikkeaa tavanomaisen asuinkerrostalon julkisivusuunnittelusta ja on siten yksi CLT-tilaelementtikerrostalon erityispiirteistä.

Tilaelementtien välisten saumojen suunnitteluohjeet perustuvat diplomityön lukuun 4.3.1. Tilaelementtien välisten pysty- ja vaakasaumojen viimeistelystä laadittiin havainnollistava kuvasarja. Ohjeiden tarkoituksena on kiinnittää suunnittelijan huomio siihen, kuinka julkisivujen valmiiksi rakentaminen tehtaalla nostaa tilaelementin esivalmistusastetta, mutta aiheuttaa myös tarpeen huolelliselle saumakohtien suunnittelulle. Jos saumat halutaan piilottaa esimerkiksi julkisivun porrastuskohtiin, se tulee huomioida jo luonnossuunnitteluvaiheessa.

Merkittäväksi aiheeksi nostettiin myös puujulkisivujen pitkäaikaiskestävyys. Ohjeistus perustuu diplomityön lukuun 4.3.2. Luvussa nostettiin esiin mm. kuultokäsittelyjen lyhyempi huoltoväli, palosuojakäsittelyjen aiheuttamat mahdolliset sävyerot eri pintojen välillä sekä rakenteellisen suojauksen merkitys julkisivun pitkäaikaiskestävyyden kannalta.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

CLT-tilaelementtirakentaminen on useimmille suunnittelijoille vierasta. Tietoa CLT-tilaelementtitekniikan erityispiirteistä on ollut julkisesti saatavilla vain vähän, mikä on vaikeuttanut rakennejärjestelmän erityispiirteiden huomioimista suunnittelutyössä. Tämän diplomityön tavoitteena oli kartoittaa, millaisilla suunnittelun keinoilla voidaan edistää CLT-tilaelementtikerrostalon kilpailukykyistä toteutettavuutta ja luoda ohjekortti, jolla tämä suunnitteluinformaatio voidaan välittää arkkitehdille helposti sovellettavassa muodossa.

6.1 Keskeiset havainnot

Työn teoriaosuudessa koottiin tietoa CLT-tilaelementtitekniikan erityispiirteistä ja haasteista erityisesti rakenne- ja arkkitehtisuunnittelun näkökulmasta. Työn alkuoletuksena oli se, että suurimmat ongelmat liittyvät eri suunnittelualojen yhteensovittamiseen. Työn edetessä painoarvoa sai kuitenkin myös rakennuttajanäkökulma, jonka mukaan CLT-tilaelementtitekniikan heikko tuntemus sekä ymmärryksen puute teollisen rakentamistavan peruseräiteistä ovat keskeisiä kilpailukykyistä toteutettavuutta vaikeuttavia tekijöitä. Tämän johdosta ohjekortissa päädyttiin esittelemään yleistietoa rakennejärjestelmän ja tilaelementtitekniikan peruseräiteistä alkuperäistä ajatusta laajemmin.

Rakennuttajanäkökulmasta tärkeimmiksi arkkitehtisuunnitteluun liittyviksi teemoiksi nousivat tilaelementtien korkean esivalmistusasteen tärkeys, teollisen rakentamistavan peruseräiteiden sisäistäminen sekä sopivan tilaelementtijaon määrittäminen. Korkeaan esivalmistusasteeseen kytkeytyy erityisesti taloteknisten ratkaisujen toteutettavuus. Teollisen rakentamistavan peruseräiteisiin kuuluu mm. sarjatuotannon mahdollisuuksien hyödyntäminen samanlaisten tilaelementtien toistamisella. Tilaelementtijaossa tulee puolestaan huomioida tilaelementin sopivan maksimikoon ja painon määrittäminen valmistuksen, kuljetuksen, käsiteltävyyden ja noston kannalta sekä kerrospohjan jakaminen mahdollisimman täysikokoisiin tilaelementteihin, jotta tilaelementtien kappalemäärä saataisiin minimoitua.

Rakennesuunnittelun keskeisimmäksi haasteeksi nousivat akustiset vaatimukset, joiden vuoksi liitoksien jäykkyys jää pieneksi ja rakennuksen jäykistäminen on haastavaa. Myös yhtenäisten suunnittelukriteerien, suunnitteluohjeiden ja teknisten hyväksyntöjen puute vaikeuttavat ja hidastavat rakennesuunnittelun prosessia. Rakenne- ja arkkitehtisuunnittelun yhteensovittamisen näkökulmasta suurimmaksi ongelmaksi osoittautuivat jäykistysratkaisut ja tilaelementtien aukotuksen rajoitteet. Suunnitteluprosessiin liittyy usein myös se ongelma, että erityisalojen suunnittelijat otetaan mukaan liian myöhäises-

sä suunnittelun vaiheessa. Yleiseksi, kaikkia hankkeiden osapuolia koskeviksi ongelmiksi osoittautuivat CLT-tilaelementtitekniikan heikko tuntemus sekä vakiintuneiden ratkaisujen puute.

Kootun tiedon perusteella tunnistettiin useita arkkitehtisuunnittelun keinoja, joilla CLT-tilaelementtikerrostalon toteutettavuutta pystytään edistämään. Yksi keino on tilaelementtijako, joka käsittää tilaelementtien sopivan maksimikoon, muodon, painon, kappalemäärän ja toistuvuuden määrittämisen. Toinen keino on märkätilojen, keittiön ja hormien tarkoituksenmukainen sijoittelu. Kolmas keino on rakennuksen jäykistykseen huomioiminen kerrospohjan jäsentelyssä. Neljäntenä tekijänä esiin nousi tilaelementtien aukotus, jossa tulisi huomioida rakenteiden kestävyys ja tilaelementtien nostettavuus.

6.2 Suunnitteluohjeen luotettavuuden arviointi

Ohjeessa päätettiin keskittyä suunnittelun peruseriaatteisiin ja niiden selkeään ja havainnolliseen esittämiseen. Periaatteiden lisäksi ohjeeseen haluttiin kuitenkin sisällyttää myös suuntaa antavia mittoja, kaavoja ja lukuarvoja, sillä niiden avulla suunnittelija pääsee konkreettisesti käsiksi suuruusluokkiin. Suunnitteluohjeiden muodostamisessa jouduttiin kamppailemaan jatkuvasti sen tosiasian kanssa, että muuttujia on liian paljon. Sen vuoksi yleispäteviä, kaikki mahdolliset arkkitehtoniset ja rakenteelliset ratkaisut huomioivia ohjeita ei pystytty laatimaan. Mittojen ja kaavojen esittäminen nähtiin kuitenkin tärkeänä, vaikka suunnitteluohjeiden muodostamisessa tiedostettiin se, että kaikissa tilanteissa juuri nämä ratkaisut eivät päde. Myös virallisten laskentaohjeiden puute tuo epävarmuutta saatuihin tuloksiin. Kun huomioidaan se, että suunnitteluohjeen tarkoituksena on antaa suuntaviivoja arkkitehtisuunnittelun alkuvaiheeseen, voidaan tarkkuustason katsoa olevan kuitenkin riittävä. Suunnitteluohje tähtää siihen, että sen avulla olisi mahdollista muodostaa CLT-tilaelementtikerrostalolle toimiva perusratkaisu, jonka yksityiskohtia on helppo lähteä kehittämään erityisalojen suunnittelijoiden kanssa.

Suunnitteluohjeen tekemisessä jouduttiin tekemään paljon valintoja sen suhteen, kuinka paljon arkkitehtisuunnittelun mahdollisuuksia voidaan ohjeessa rajoittaa. Tosiasiassa lähes mitä tahansa ratkaisuja on mahdollista toteuttaa, mutta se näkyy kustannuksissa ja toteutuksen haastavuudessa. Suunnitteluohjeiden muodostamisen lähtökohdaksi otettiin se ajatus, että tilaelementtitekniikan perusluonteeseen kuuluu pyrkimys kustannustehokkaaseen teolliseen tuotantotapaan. Ohjeessa päätettiin siis ohjata ratkaisuja ennen kaikkea sellaiseen suuntaan, että tilaelementtitekniikan käyttö olisi mielekästä ja sillä saatavat edut olisi mahdollista saavuttaa. Ohjeessa pyrittiin kuitenkin tarvittaessa mainitsemaan, että myös ohjeesta poikkeavat ratkaisut ovat mahdollisia, jos niiden aiheuttamat kustannusvaikutukset tai hankalammat ratkaisut ovat hyväksyttävissä.

Suunnitteluohjeessa esitelty rakennejärjestelmä pohjautuu vuoteen 2017 mennessä valmistuneiden kohteiden teknisiin ratkaisuihin ja kirjoitusajankohtana voimassa oleviin määräyksiin. Ehkä suurin suunnitteluohjeeseen liittyvä epävarmuustekijä on se, että

CLT-tilaelementtitekniikka on jatkuvan kehityksen ja muutoksen alla. Osa ohjeessa esitetyistä teknisistä ratkaisuksista tulee todennäköisesti vanhenemaan ja osa järjestelmän rajoitteista saattaa poistua uusien innovaatioiden myötä. Myös lainsäädännössä tapahtuvat muutokset voivat tuoda CLT-tilaelementtitekniikalle uusia mahdollisuuksia tai rajoitteita. Jotta ohjekortti olisi käyttökelpoinen myös tulevaisuudessa, se vaatisi päivittämistä. On myös mahdollista, että CLT-tilaelementtitekniikka ei kehity riittävän kilpailukykyiseksi betonirakentamiseen ja muihin puukerrostalokonsepteihin nähden ja kiinnostus rakennustekniikkaa kohtaan hiipuu.

Ohjekortin kannalta puute voi olla myös se, jos tiedon keräämisessä jokin keskeinen CLT-tilaelementtikerrostalon toteutettavuuteen vaikuttava arkkitehtisuunnittelun keino jäi kokonaan tunnistamatta. Joidenkin aiheiden tarkempi käsittely jouduttiin rajaamaan ohjekortista pois siksi, että niihin kytkeytyi liian paljon tapauskohtaista detajiiikkaa. Näitä olivat erilaisten parvekeratkaisujen tarkempi ohjeistaminen sekä ulokkeena toimivien tilaelementtien toteuttamismahdollisuudet. Näitä aiheita voisi olla syytä käsitellä tulevaisuudessa omina tutkimusaiheinaan, sillä niihin liittyy arkkitehtonisia mahdollisuuksia, joiden tuoma lisäarvo voi olla CLT-tilaelementtitekniikalle merkittävää.

6.3 Kehitys- ja jatkotutkimusaiheita

Työn edetessä tuli vastaan useita ongelmia, jotka liittyvät suunnitteluohjeiden ja vakioitujen rakenneratkaisujen puutteeseen. Suunnittelua vaikeuttaa ja hidastaa se, että mo-
neen asiaan ei ole olemassa yleisesti hyväksyttyjä suunnittelukriteerejä tai vakioratkaisuja. Monet suunnittelukriteerit ja lähtöarvot joudutaan määrittämään tapauskohtaisesti, jolloin niiden hyväksyttävyyden arviointi on työlästä ja lopputulos saattaa olla epävarma. Vakioratkaisujen kehittäminen, kuten liitososien ominaisuuksien määrittely, nopeuttaisi suunnittelua oleellisesti ja parantaisi ratkaisujen luotettavuutta. Työn edetessä esiin nousivat mm. seuraavat kehittämistä kaipaavat aihealueet:

1) CLT:n sisällyttäminen Eurokoodeihin. Suunnittelua ja eri tuotteiden kilpailutusta helpottaisivat yhtenäiset mitoituskaavat kaikille CLT-tuotteille. Toistaiseksi mitoitusperiaatteet ovat tuotekohtaisia.

2) Rakennetyyppien ja detajien vakioiminen. Rakenneratkaisut ovat kehittyneet ja eläneet jatkuvasti eri kohteiden välillä. Esimerkiksi kipsilevytysten ja CLT:n paksuuden muuttuminen kesken suunnittelun aiheuttaa erityisesti arkkitehtisuunnitteluun työläitä muutoksia. Jotta päästäisiin tehokkaaseen suunnitteluprosessiin, tulisi rakennetyypit ja detajit vakioida.

3) Liitososien vakioiminen. Suunnittelua ja toteutusta saataisiin tehostettua vakioidulla liitososilla, joille olisi valmiiksi määritetty jäykkyydet ja kapasiteetit ja joiden akustinen toiminta olisi testattu.

4) Palokipsilevyn murtumishetken t_f määrittely. Suojaverhotun CLT-rakenteen palomitoituksessa päästään hyvin erilaisiin tuloksiin sen mukaan, mitä arvoa palokipsilevyn murtumishetkelle t_f käytetään, joten luotettavasti määritetty t_f :n arvo olisi syytä sisällyttää suunnitteluohjeisiin.

5) Tilaelementtien noston suunnitteluohjeet. Tilaelementtien noston suunnitteluun tulisi luoda suunnitteluohje, jonka mukaan noston dynaamiset vaikutukset ja tarvittava varmuus voitaisiin määritellä.

6) Suunnitteluohjeet CLT-seinien jäykistyskapasiteetin laskentaan. Aukotettujen seinien jäykistyskapasiteetin analysointi ilman valmista menetelmää on hyvin työlästä ja aikaa vievää.

7) Laskentamenetelmä vaakakuormien jakautumisesta CLT-tilaelementtikerrostalossa. Suunnittelua helpottaisi luotettava käsinlaskentamenetelmä, jolla voitaisiin määrittää vaakakuormien jakautuminen jäykistäville rakenteille.

8) Ohjeet rakennusrungon värähtelyn arvioimiseen. Värähtelyn hyväksyttävyyden arvioimiseen tulisi muodostaa yhtenäiset suunnittelukriteerit. Eurokoodeihin tulisi sisällyttää ohjeet myös poikkisuuntaisen värähtelyn ja vääntövärähtelyn huomioimiseen. CLT-tilaelementtikerrostalon sisäisestä vaimennuksesta tarvittaisiin tutkimus- ja mittauksia.

9) Vaakasiirtymän raja-arvon määrittäminen. Suunnitteluohjeisiin tulisi sisällyttää yhteisesti hyväksytty raja-arvo puukerrostalon vaakasiirtymälle.

Lisäksi nousi esiin muutamia asioita, joiden teknisellä ratkaisemisella voitaisiin saavuttaa uusia rakenteellisia ja arkkitehtonisia mahdollisuuksia erityisesti kerrospohjan jäsenelyssä:

- 1) Kahden eri asunnon tilojen sijoittaminen samaan tilaelementtiin, esim. märkätilat samaan moduuliin.
- 2) Kahdesta tilaelementistä muodostuvan huoneiston keskelle jäävän CLT-väliseinän saaminen jäykistäväksi seinäksi.
- 3) Tuplaseinistä molempien saaminen jäykistäviksi.
- 4) Kantavia seiniä myös tilaelementin keskelle, jolloin tilaelementtien suuntaa voisi vaihdella eri kerrosten välillä.

6.4 Lopuksi

Tässä diplomityössä keskityttiin suunnittelun ohjeistamiseen vain yhdestä tarkasti rajatusta näkökulmasta eli arkkitehtisuunnittelun alkuvaiheen näkökulmasta. Kuten edellä

olevista luetteloista voidaan nähdä, CLT-tilaelementtikerrostalon suunnitteluprosessiin liittyy paljon muitakin, erityisesti rakennesuunnitteluun liittyviä osa-alueita, joista tarvittaisiin jatkotutkimusta ja suunnitteluohjeiden kehittämistä.

Diplomityössä koottiin yhtenäiseksi esitykseksi monesta lähteestä koottua kokemusperäistä ja kirjallisista tietoa sekä sovellettiin sitä suunnitteluohjeistusten muodostamiseen. Vastaavan laajuista, CLT-tilaelementtikerrostalon arkkitehtisuunnittelun reunaehtoja yhteen kokoavaa esitystä ei tiettävästi ole aikaisemmin tehty, joten ohjekortti tarjoaa uuteen muotoon sovellettua tietoa. Ohjekortista tehtiin tarkoituksella tiivis tietopaketti, jotta tiedot olisivat helposti löydettävissä ja käytettävissä.

Ohjekorttiluonnokseen pyydettiin kehitysehdotuksia useilta CLT-tilaelementtitekniikan ja puurakentamisen asiantuntijoilta. Olisi ollut mielenkiintoista päästä myös testaamaan ohjekorttia potentiaalisilla käyttäjillä ja kehittää sitä saadun palautteen perusteella. Diplomityön aikataulun puitteissa tällaisen järjestäminen ei kuitenkaan ollut mahdollista. Toiveena on, että ohjekortista voisi olla hyötyä käytännön suunnittelutyössä ja että se voisi toimia CLT-tilaelementtirakentamisen tietolähteenä myös muille hankkeiden osapuolille sekä opiskelijoille.

LÄHTEET

Haastattelulähteet

Arkkitehti 1. 4.10.2016. Puhelinhaastattelu. Kirjallinen muistio lähetetty tarkastettavaksi sähköpostitse. Haastattelun aihe: CLT-tilaelementtitekniikan vaikutukset arkkitehtisuunnitteluun.

Arkkitehti 2. 10.10.2016. Sähköpostihaastattelu. Haastattelun aihe: CLT-tilaelementtitekniikan vaikutukset arkkitehtisuunnitteluun.

Arkkitehti 3. 19.12.2016. Sähköpostihaastattelu. Haastattelun aihe: CLT-tilaelementtitekniikan vaikutukset arkkitehtisuunnitteluun.

Tilaelementtitehtaan 1 edustaja. 9.12.2016. Sähköpostihaastattelu. Haastattelun aihe: Tilaelementin maksimimitat ja maksimipaino sekä tuotantoprosessiin liittyviä asioita.

A. Hentinen. 1.12.2016. Sähköpostihaastattelu. Haastattelun aihe: CLT-tilaelementtikerrostalon jäykistys.

A. Hentinen. 9.12.2016. Sähköpostihaastattelu. Haastattelun aihe: CLT-tilaelementin nosto.

V. Lehtimäki. 22.9.2016. Sähköpostihaastattelu. Haastattelun aihe: CLT-tilaelementtikerrostalon käyttörajatilamitoitus.

L. Lepikonmäki. 21.9.2016. Sähköpostihaastattelu. Haastattelun aihe: CLT-tilaelementtikerrostalon käyttörajatilamitoitus.

L. Lepikonmäki. 30.11.2016. Sähköpostihaastattelu. Haastattelun aihe: CLT-tilaelementtikerrostalon jäykistys.

J. Liimatainen. 12.8.2016. Puhelinhaastattelu. Kirjallinen muistio tarkastettu ja täydennetty sähköpostitse 15.8.2016. Haastattelun aihe: CLT-tilaelementtirakentamisen mahdollisuudet ja rajoitteet rakennuttajan näkökulmasta.

M. Takala. 30.11.2016. Sähköpostihaastattelu. Haastattelun aihe: CLT-tilaelementtitekniikan vaikutukset arkkitehtisuunnitteluun.

K. Ullakko. 29.9.2016. Puhelinhaastattelu. Kirjallinen muistio lähetetty tarkastettavaksi sähköpostitse. Haastattelun aihe: CLT-tilaelementtirakentamisen mahdollisuudet ja rajoitteet rakennuttajan näkökulmasta.

J. Pakkala. 2.12.2016. Sähköpostihaastattelu. Haastattelun aihe: CLT-tilaelementtitekniikan vaikutukset arkkitehtisuunnitteluun.

Kirjalliset lähteet

BES 2010. Korkeiden rakennusten jäykistys. Luettavissa:

<http://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/rakennejarjestelmat/rakennuksen-jaykistys/laskentaperiaatteet>

Betoniteollisuus ry. 2010. Betonielementtien nostolenkit ja -ankkurit. Suomen Rakennusmedia Oy. Luettavissa:

http://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/23860/Betonielementtien_nostolenkit_ja_-ankkurit_2010%20+%20Muutokset_2014_07.pdf

Binderholz Bausysteme GmbH. Binderholz CLT BBS brochure. Luettavissa:

http://www.binderholz.com/fileadmin/PDF/Services_Kontakt/Videos_Download/Prospekte/BBS_GB_WEB.pdf

R. Brandner; G. Flatscher; A. Ringhofer; G. Schickhofer; A. Thiel. 2016. Cross laminated timber (CLT): overview and development. European Journal of Wood and Wood Products 05/2016. Volume 74, Issue 3, pp 331–351.

N. Blismas; R. Wakefield. 2008. Drivers Constraints and the Future of Off-Site Manufacture in Australia. Construction Innovation. Special Edition 2008.

Boverket. 1997. Boverkets handbok om snö- och vindlast. Utgåva 2. Tryckeri Balder. ISBN: 91-7147-394-7. ISSN: 1400-1012. Luettavissa:

<http://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/1998/handbok-sno-vindlast-utg-2.pdf>

N. Boyd; M. M. A. Khalfan; T. Maqsood. 2013. Off-Site Construction of Apartment Buildings. Case Study. Journal of Architectural Engineering 3/2013.

CLT Finland Oy. 2016. HOISKO CLT-levyn perustiedot. Luettavissa:

http://www.hoisko.fi/wp-content/uploads/2016/11/HOISKO_clt-perustiedot.pdf

CrossLam. 2015. Välipohjan kestävyys. Esimerkkilaskelma 4. Luettavissa:

<http://www.crosslam.fi/tekniset-maarittelyt/rakenteet-ja-esimerkkilaskelmat.html>

Cross Timber Systems. 2014. Meet the CLT technology. Cross Timber Systems Brochure. Luettavissa: http://www.crosstimbersystems.com/wp-content/uploads/2014/11/CTS_bros.pdf

C. M. Eastman; R. Sacks. 2008. Relative Productivity in the AEC Industries in the United States for On-Site and Off-Site Activities. Journal of Construction Engineering & Management 07/2008, Vol. 134 Issue 7.

- ELY-keskus. 2010. Erikoiskuljetukset. Erikoiskuljetusluvan tarve, hakeminen ja käytännön toimenpiteet. Luettavissa: http://www.ely-keskus.fi/documents/10191/139801/erikoiskuljetukset_esite_2010_erikoiskuljetusluvan_tarve_hakeminen_ja_kaytannon_toimenpiteet.pdf/cbcf0229-5b1f-4e7e-8d9b-9bad0a271b51
- M. Engblom. 2015. Puun suojaaminen ja huoltovälin pidentäminen. Puupäivä 26.11.2015.
- ETA-06/0138. 2011. KLH solid wood slabs. KLH Massivholz GmbH. European technical approval. Austrian Institute of Construction Engineering.
- ETA-08/0271. 2011. CLT – Cross Laminated Timber. Stora Enso wood products. European Technical Approval. Deutsches Institut für Bautechnik.
- ETA-13/0684. 2013. Martinsons KL-trä. Solid wood slab element to be used as a structural element in buildings. Martinsons Såg AB. European technical approval. SITAC.
- ETA-14/0349. 2014. CLT – Cross Laminated Timber. Stora Enso wood products. European technical assessment. Austrian Institute of Construction Engineering.
- EN 1991-1-4. 2011. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-4: Yleiset kuormat. Tuulikuormat.
- EN 1995-1-1. 2014. Eurokoodi 5: Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.
- EN 1995-1-2. 2015. Eurokoodi 5. Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Yleistä. Puurakenteiden palomitoitus.
- EOTA. 2015. EAD 130005-00-0304. Solid wood slab element to be used as a structural element in buildings. European Assessment Document.
- A. Falk. 2005. Architectural aspects of massive timber. Structural Form and Systems. Doctoral thesis. Luleå University of Technology. Department of Civil and Environmental Engineering. Division of Structural Engineering . Timber Structures.
- Finnish Wood Research. 2013. RunkoPES 2.0. Osa 11: Rakennetyyppikirjasto. 31.12.2013. Luettavissa: <http://www.puuinfo.fi/suunnitteluohjeet/runkopes-20>
- P. Heikkinen; A. Kaila. 2015. Paras puuverhous - teoriaa ja käytäntöä. Puupäivä 26.11.2015.
- J. D. Holmes. 2015. Wind loading of structures. Chapter 5: Resonant dynamic response and effective static load distributions. Third Edition. CRC Press.

V. Ijäs. 2013. Puukerrostalojen rakentamisen esteet ja mahdollisuudet. Keskeisten suomalaisten rakentamis- ja kiinteistöalan sidosryhmien vertaileva asennemittaus. Väitöskirja. Tampereen teknillinen yliopisto. Julkaisu 1142. Luettavissa: <https://tutcris.tut.fi/portal/files/2652042/ijas.pdf>

ISO 10137. 2007. Bases for design of structures – Serviceability of buildings and walkways against vibrations.

J. Jantunen. 2012. Uudet rakennusten palomääräykset. RY Rakennettu Ympäristö. Lehti 1/2012. Luettavissa: <http://www.rakennustieto.fi/lehdet/ry/index/lehti/6918i5mLz.html>

M. Karjalainen. 2002. Suomalainen puukerrostalo puurakentamisen kehittämisen etulinjassa. Väitöskirja. Oulun yliopisto. Arkkitehtuurin osasto. Luettavissa: <http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/Suomalainen%20puukerrostalo%20puurakentamisen%20kehitt%C3%A4misen%20etulinjassa.pdf>

M. Karjalainen; M. Viljakainen. 2013. Kestävät puujulkisivut ja kerrostalojen asuntosprinklaus. Artikkelijulkaisussa Rakentajan kalenteri 2013 s. 117-122. Luettavissa: <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK130401.pdf>

M. Karjalainen. 2017. Puukerrostalojen asukas- ja rakennuttajakysely 2017. Loppuraportti 11.6.2017. Ympäristöministeriö. Luettavissa: http://www.ym.fi/download/Puukerrostalojen_asukaskysely_2017_Loppuraporttipdf/de24e1b6-b79d-4498-b7de-de837ee89d88/128751

A. Kevarinmäki. 2014. RIL 205-1-2009 CLT päivitykset 7.5.2014.

M. Klippel; J. Schmid; A. Frangi. 2016. Fire Design of CLT. Julkaisusta *Proceedings of the Joint Conference of COST Actions FP1402 & FP1404 KTH Building Materials 10.3.2016. Cross Laminated Timber – A competitive wood product for visionary and fire safe buildings (toim. A. Falk; P. Dietsch; J. Schmid)*. KTH Royal Institute of Technology. Division of Building Materials.

J. Koiso-Kanttila. 2000. Puinen kerrostalo. Teoksesta *Metsä ja puu IV – Puinen rakennus*. Toimittanut Eero Paloheimo. Teknillinen korkeakoulu/puurakentaminen. Kustantanut Rakennustieto Oy. ss. 106-131.

P. Kortelainen. 2012. Korkeiden rakennusten vaste tuulikuormituksessa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Luettavissa: <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/21761/Kortelainen%20Petri.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

S. Kotilainen; M. Hedman. 2015a. Asukaslähtöinen puukerrostalokortteli tilaelementeistä. Esimerkkinä Kokkolan Nukkumatin tontin suunnitelma. Tampereen teknillinen yliopisto. Arkkitehtuurin laitos. Asuntosuunnittelu. Julkaisu 17. Luettavissa: https://tutcris.tut.fi/portal/files/3004613/Asukaslahtoinen_puukerrostalokortteli_tilaelementeista.pdf

S. Kotilainen; M. Hedman. 2015b. Mikä estää joustavan asuntorakentamisen? ARA-viestin verkkoartikkelit. Julkaistu 24.9.2015. Luettavissa: [http://www.ara.fi/fi-FI/ARAtietopankki/ARAviesti/ARAviestin_verkkoartikkelit/Mika_estaa_joustavan_asuntorakentamisen\(35611\)](http://www.ara.fi/fi-FI/ARAtietopankki/ARAviesti/ARAviestin_verkkoartikkelit/Mika_estaa_joustavan_asuntorakentamisen(35611))

T. Lahtela. 2014a. Lattia. Värähtelymitoitus. TuplaA-koulutusmateriaali 2014. Luettavissa: <http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/info/moduuli-4/84lattianvarahtelymitoitus.pdf>

T. Lahtela. 2014b. Puukerrostalo – talotekniikka. Lämpö, vesi, ilmanvaihto. Puurakentamisen tekninen roadshow 2014. Puuinfo Oy. Luettavissa: http://puuinfo.fi/sites/default/files/content/tiedotteet/puukerrostalorakentamisen-tekninen-roadshow-2014/8_talotekniikka.pdf

R. M. Lawson; P. J. Grubb; P. J. Trebilock. 1999. Modular construction using Light Steel Framing: An Architects guide. SCI publication P272. The Steel Construction Institute.

R. M. Lawson; R. G. Ogden. 2010. Sustainability and Process Benefits of Modular Construction. 18th CIB World Building Congress 05/2010. Salford, United Kingdom.

L. Lepikonmäki. 2014. Puukerrostalojen jäykistysratkaisut käytännössä. Puupäivä 27.11.2014. Luettavissa: <http://2014.puupaiva.com/sites/default/files/Puukerrostalojen%20j%C3%A4ykistysratkaisut%20k%C3%A4yt%C3%A4nn%C3%B6ss%C3%A4.pdf>

Liikenne- ja viestintäministeriö. 2012. Liikenne- ja viestintäministeriön asetus erikoiskuljetuksista ja erikoiskuljetusajoneuvoista. Luettavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2012/20120786>

J. Luntta. 2013. Ristiinliimattu massiivipuulevykenttä rungon vaakakuormia siirtävänä rakenteena. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Insinööritieteiden korkeakoulu. Rakenne- ja rakennustuotantotekniikan koulutusohjelma. Rakennetekniikka.

Martinsons. 2006. Massivträ. Handboken 2006. Verkkojulkaisu. Luettavissa: www.martinsons.se/default.aspx?id=9090

MERK Timber. 2015. Leno® Cross Laminated Timber (CLT). Tuote-esite. Luettavissa: [http://en.zueblin-timber.com/databases/internet/_public/files.nsf/SearchView/46580A2F213F2D9DC1257EBC004DC1E8/\\$File/Leno-brochura_ENG_012015.pdf](http://en.zueblin-timber.com/databases/internet/_public/files.nsf/SearchView/46580A2F213F2D9DC1257EBC004DC1E8/$File/Leno-brochura_ENG_012015.pdf)

T. Moosbrugger; W. Guggenberger; T. Bogensperger. 2006. Cross-Laminated Timber Wall Segments under homogeneous Shear with and without Openings. 9th World Conference on Timber Engineering.

I. Näslund & H. Johnsson. 2014. Horizontal Displacements in Medium-Rise Timber Buildings: Basic FE Modeling in Serviceability Limit State. Materials and Joints in Timber Structures. RILEM Bookseries vol.9 pp.3-12.

ProHolz. 2014. Cross-Laminated Timber. Structural Design. Basic design and engineering principles according to Eurocode. Luettavissa: https://issuu.com/storaenso/docs/cross-laminated_timber__clt__struct?e=7939336/10035944

Puuinfo. 2012. Pintojen ja katteiden paloluokat. Tekninen tiedote 19.3.2012. Luettavissa: <http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/pintojen-ja-katteiden-paloluokat.pdf>

Puuinfo. 2013a. Parveke ja luhtikäytävä (3-8/P2). Tekninen tiedote 4.6.2013. Luettavissa: <http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/suunnitteluohjeet/parveke-ja-luhtikaytava-3-8p2/parveke-ja-luhtikaytava-3-8p2/parvekejaluhtikaytava38p2.pdf>

Puuinfo. 2013b. Puu pintamateriaalina_talo. Tekninen tiedote 1.3.2013. Luettavissa: <http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/suunnitteluohjeet/puu-pintamateriaalinatalo/puupintamateriaalinatalo1313.pdf>

Puuinfo. 2015. Puukerrostalon toiminnallinen palotekninen suunnittelu. Tekninen tiedote 26.10.2015. Luettavissa: <http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/Puukerrostalon%20toiminnallinen%20palotekninen%20suunnittelu.pdf>

Puuinfo. 2016a. Paloräystäs. Tekninen tiedote 31.3.2016. Luettavissa: http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/TEKNINEN_TIEDOTE_Palor%C3%A4yst%C3%A4s.pdf

Puuinfo. 2016b. Puujulkisivun palokatko. Tekninen tiedote 31.3.2016. Luettavissa: http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/TEKNINEN_TIEDOTE_Puujulkisivun%20palokatko.pdf

PUUSTA Innovations. 2014. Mallikerrostalo. Rakennuslupapiirustukset. Ladattavissa: <http://www.puuinfo.fi/suunnitteluohjeet/runkopes-20>

J. Rannisto. 2013. Modulaarisen rakentamisen mahdollisuudet vuokra-asuntomarkkinoilla. Julkaisussa *Moduulirakentaminen: teräskennoteknologian mahdollisuudet (toim. J. Sorri)*. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustuotanto ja –talous. Raportti 14.

A. L. Rogan; R. M. Lawson; N. Bates-Brkljac. 2000. Value and benefits assessment of modular construction. Sarjasta *Better value in steel*. The Steel Construction Institute. Luettavissa: <http://www.designforhomes.org/wp-content/uploads/2012/03/ModularSteel.pdf>

RT 21-10978. 2009. Puutavara – Sahattu, höylätty ja jatkojalosteet. Rakennustietosäätiö.

RT 98-11213. 2016. Ajoneuvojen mittoja. Rakennustietosäätiö.

T. Ruutikainen. 2013. Kennosta kodiksi - Tutkielmia moduulirakenteisista asuinkerrostaloista. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Arkkitehtuurin laitos. Asuntosuunnittelu. Julkaisu 8. Luettavissa: <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/21460/ruutikainen.pdf?sequence=1>

R. E. Smith. 2010. Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction. John Wiley & Sons, Inc. Painettu Yhdysvalloissa.

J. Sorri; K. Kähkönen; J. Rannisto. 2013. Construction Business with Innovative Cellular Structures, Modules and Buildings. Julkaisussa *Proceedings, Organisation and Management of Construction, Selected papers presented at the CIB World Building Congress, Construction and Society, Brisbane 5-9 May 2013*. CIB International Council for Research and Innovation in Building and Construction.

Stora Enso. 2016a. Building Systems by Stora Enso. 3-8 Storey Modular Element Buildings. Version 0.1. Luettavissa: http://assets.storaenso.com/se/buildingandliving/ProductServicesDocuments/Building-Systems-by-Stora-Enso_Modular_Element_Buildings_15062016_web.pdf

Stora Enso. 2016b. CLT – Cross laminated Timber. Fire protection. Version 01/2016. Luettavissa: <http://www.clt.info/wp-content/uploads/2015/10/CLT-Documentation-on-fire-protection-EN.pdf>

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 2009a. 205-1-2009. Puurakenteiden suunnitteluohje. Eurokoodi EN 1995-1-1.

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 2009b. 205-2-2009. Puurakenteiden suunnitteluohje. Eurokoodi EN 1995-1-2.

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 2012. RIL 205-1-2009 korjaukset 30.1.2012.

Suomen Rakentamismääräyskokoelma osa E1. 1997. Rakennusten paloturvallisuus. Määräykset ja ohjeet. Ympäristöministeriö. Asunto- ja rakennusosasto.

Suomen Rakentamismääräyskokoelma osa E1. 2002. Rakennusten paloturvallisuus. Määräykset ja ohjeet. Ympäristöministeriö. Asunto- ja rakennusosasto.

Suomen Rakentamismääräyskokoelma osa E1. 2011. Rakennusten paloturvallisuus. Määräykset ja ohjeet. Ympäristöministeriö. Rakennetun ympäristön osasto.

A. Talja; L. Fülöp. 2016. Evaluation of wind-induced vibrations of modular buildings. Customer report VTT-CR-03593-16. VTT Technical Research Centre of Finland.

Y. Tamura. 2007. Wind Resistant Design of Tall Buildings in Japan. 1st International Conference on Modern Design, Construction and Maintenance of Structures. Hanoi Vietnam.

B. S. Taranath. 2010. Reinforced concrete design of tall buildings. CRC Press. 923 p.

Teräsrakenneyhdistys. 2005. Teräsnormikortti N:o 17/2005. Kävelystä aiheutuvat välipohjien värähtelyt. Luettavissa:
http://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/273/8c9be8a/Normikortti17_2005.pdf

P. Tojkander. 2011. Puukerrostalon muodonmuutokset. Opinnäytetyö. Saimaan ammattikorkeakoulu. Tekniikka Lappeenranta. Rakennustekniikka. Luettavissa:
https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/33610/tojkander_petri.pdf?sequence=2&isAllowed=y

J. Vessby. 2011. Analysis of shear walls for multi-storey timber buildings. Doctoral dissertation. Linnaeus University Dissertations No 45/2011. ISBN: 978-91-86491-73-4.

E. Virtanen. 2015. Assessment of vibration comfort criteria for tall buildings. Master's Thesis. Aalto University. School of Engineering. Department of Civil and Structural Engineering.

VTT Expert Services Oy. 2014. RIL 205-1-2009 CrossLam Kuhmo CLT päivitys 27.1.2014.

VTT Expert Services Oy. 2015. VTT-C-11272-14. Oy CrossLam Kuhmo Ltd valmistama CrossLam Kuhmo CLT massiivipuulevy. Tuotesertifikaatti.

H. Werner. 2014. Load tables for a transport anchor system with Würth ASSY® 3.0 combi self-tapping screws $d = 10$ mm as defined under ETA-11/0190 (6/27/2013).

H. Weckman. 2003. Rakennustarvikkeiden uudet eurooppalaiset paloluokitukset. Artikkelijulkaisussa Rakentajan kalenteri 2003 s. 541-546. Luettavissa: <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK030402.pdf>

Ympäristöministeriö. 2007a. Kansallinen liite standardiin EN 1995-1-1 Eurokoodi 5: Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.

Ympäristöministeriö. 2007b. Kansallinen liite standardiin EN 1993-1-1 Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.

Ympäristöministeriö 2016. Luonnos asetukseksi rakennusten paloturvallisuudesta. Luettavissa: <http://www.ym.fi/download/noname/%7B9B4E97FA-3286-4BC6-86B5-85F0386156F4%7D/123505>

A. Özpekmezci; M. Rappne. 2016. Möjligheter med modulbostäder för nyanlända. Examensarbete. KTH Vetenskap och konst. Luettavissa: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:973852/FULLTEXT01.pdf>

LIITE A: HAASTATTELUKYSYMYKSET

RAKENNUTTAJIEN EDUSTAJIEN HAASTATTELUT

Kysymysrunko 1:

1. Millaisia ongelmia tilaelementtirakentamiseen liittyy?
2. Mitkä ovat CLT-tilaelementtirakentamisen suurimmat edut?
3. Millaisia betonirakentamisesta poikkeavia ratkaisuja CLT-tilaelementtitekniikka mahdollistaa?
4. Rajoittaako tilaelementtitekniikka asuntojen pohjapiirrosta?
5. Millaisia asioita arkkitehtisuunnitelmissa on muutettu, jotta on päästy toteuttamiskelpoiseen ratkaisuun?
6. Millaisia asioita arkkitehdin tulisi huomioida talotekniikan suhteen?
7. Miksi tilaelementtikohteissa on toteutettu huomattavan suuria porrashuoneita?
8. Kuinka suuri merkitys on samanlaisten ja samankokoisten tilaelementtien toistuvuudella? Kasvavatko kustannukset olennaisesti siitä, jos jokin kerros tai yksittäinen tilaelementti on erilainen kuin muut?

ARKKITEHTISUUNNITTELIJOIDEN HAASTATTELUT

Kysymysrunko 2:

1. Millaisia mielikuvia halusit puumateriaalin synnyttävän suunnittelemassasi puukerrostalossa?
2. Mitä ajattelet puukerrostalosta, jonka julkisivumateriaali on jotain muuta kuin puuta?
3. Miten suhtaudut tilaelementtirakenteen näkymiseen rakennuksen ulkohahmossa? Häivytätkö mieluummin saumat vai voiko tilaelementtirakenne olla massoitte-
lussa näkyvä arkkitehtoninen aihe?
4. Millaisia uusia aiheita tilaelementtitekniikka voisi tuoda asuinkerrostalojen massoitte-
luun/ulkoarkkitehtuuriin verrattuna tavanomaisiin betonikerrostaloihin?

5. Millä tavalla asuntojen muodostaminen suorakaiteen muotoisista tilaelementeistä vaikutti pohjapiirrosten suunnitteluun? Onko tilaelementtitekniikalla helppo suunnitella hyviä asuntoja?

6. Miten tilaelementtitekniikka vaikutti kerrospohjan suunnitteluun?

7. Kun lähdit suunnittelemaan ensimmäistä tilaelementtikerrostaloa, millaiset lähtötiedot sait/hankit tilaelementtirakennuksen suunnitteluperiaatteista? Mistä lähteestä sait lähtötiedot esim. tilaelementtien mittoihin?

8. Mitkä ovat mielestäsi keskeisimmät keinot siihen, että rakenteelliset, tuotannolliset ja talotekniset näkökulmat pystyttäisiin ottamaan huomioon jo arkkitehtisuunnittelun alkuvaiheesta lähtien?

9. Millaisia muutoksia seuraavat tekijät ovat aiheuttaneet suunnitelmiin / arkkitehtoniisiin aiheisiin suunnitteluprosessin aikana (esim. ikkuna siirretty, alun perin näkyväksi ajateltu puupinta peitetty kipsilevyllä, tilojen järjestystä muutettu talotekniikan vuoksi, jokin ratkaisu karsittu rakennuskustannusten vuoksi jne.) :

- Paloturvallisuus

- Rakennuskustannukset

- Talotekniikka

- Tehdastuotannon vaatimukset

- Rakenteiden kestävyys (esim. jäykistävät rakenteet, aukkojen sijoitus ja koko, ulokkeiden pituus, pilarien tai palkkien lisääminen)

- Rakennusfysiikka (rakenteiden kosteusturvallisuus, lämmöneristys, akustiikka)

10. Kun arkkitehti lähtee suunnittelemaan ensimmäistä kertaa CLT-tilaelementtikerrostaloa, mistä aihealueista hän erityisesti tarvitsee suunnittelutietoa? Korosta listasta tärkeät aihealueet tai keksi uusia.

Kysymysrunko 3:

1. Mitä ajattelet puukerrostalosta, jonka julkisivumateriaali on jotain muuta kuin puuta?

2. Rajoittavatko puukerrostalon palomääräykset arkkitehtuuria liikaa?

3. Miten suhtaudut tilaelementtirakenteen näkymiseen rakennuksen ulkohahmossa? Häivytätkö mieluummin saumat vai voiko tilaelementtirakenne olla massoitellussa näkyvä arkkitehtoninen aihe?

4. Onko tilaelementtitekniikalla helppo suunnitella hyviä asuntoja? Mitkä reunaehdot rajoittavat eniten erilaisten asuntopohjien muodostamista?

5. Mitkä ovat mielestäsi keskeisimmät keinot siihen, että rakenteelliset, tuotannolliset ja talotekniset näkökulmat pystyttäisiin ottamaan huomioon jo arkkitehtisuunnittelun alkuvaiheesta lähtien?

RAKENNESUUNNITTELIJOIDEN HAASTATTELUT

Kysymysrunko 4:

1. Millainen merkitys käyttörajatilamitoituksella on CLT-tilaelementtikerrostalon suunnittelussa? Mitkä tekijät vaikuttavat CLT-tilaelementtirakenteessa siihen, että käyttörajatilan ilmiöt tulevat helposti määrääviksi?

2. Mitkä ovat suunnittelun keinot rajoittaa vaakasiirtymää CLT-tilaelementtikerrostalossa?

3. Mitkä ovat suunnittelun keinot rajoittaa tuulen aiheuttamaa värähtelyä CLT-tilaelementtikerrostalossa?

4. Kuinka korkeassa CLT-tilaelementtikerrostalossa tuulen aiheuttama rakennusrungon värähtely tulee kokemustesi mukaan määrääväksi tai täytyisi ainakin tarkistaa?

5. Mitä suuruusluokkaa CLT-tilaelementtikerrostalojen laskennalliset ominaistuuudet ovat olleet eri korkuisilla rakennuksilla?

6. Eurokoodi EN 1991-1-4 ei anna ohjeita rakennusten vääntövärähtelyyn. Miten vääntövärähtely on huomioitu käytännön suunnittelutyössä?

7. Miten ääneneristyskumin tyyppi valitaan?

8. Miten CLT-rungon painuma huomioidaan julkisivujen suunnittelussa?

Kysymysrunko 5:

1. Mitkä ovat olleet rakenne- ja arkkitehtisuunnittelun yhteensovittamisen suurimmat ongelmat?

2. Stora Enson ohjeen mukaan pitäisi huomioida rakenteen toispuoleisesta hiiltymisestä aiheutuva lisäepäkeskeisyys. Miten tämä on käytännössä huomioitu?

3. Voidaanko CLT-rakenne palomitoittaa siten, että teholliseen poikkileikkaukseen jää jäljelle vain yksi kuormaa kantava lamelli?
4. Millä tavalla kattotason jäykkyys vaikuttaa kuormien jakautumiseen jäykistävälle seinille? Miten tason pienempi jäykkyys vaikuttaa seinille ja perustuksille tuleviin rasituksiin verrattuna jäykkänä toimivaan betonivälipohjaan?
5. Mitkä tekijät tekevät tilaelementtikerrostalon jäykistyksestä poikkeavaa/haastavaa?
6. Swecon kohteissa jäykistävät seinät on huomioitu kokonaisina. Onko jäykistäväksi seinäksi mahdollista ottaa vain osa seinästä? Mitä siitä seuraa ja miksi niin ei ole tehty?
7. Miksi kahden moduulin asunnoissa ei valita jäykistäväksi seinäksi huoneiston sisäistä väliseinää?
8. Millä keinoilla nosteita saadaan pienennettyä?
9. Jos arkkitehti pitäisi ohjeistaa siitä, mitkä seinät ovat hyviä jäykistäviä seiniä ja mitkä eivät, niin millaisia seiniä ensisijaisesti suosittelisitte jäykistäviksi?
10. Mitkä jäykistysjärjestelmän geometriset ominaisuudet parantavat rakennuksen jäykkyyttä?

Kysymysrunko 6:

1. Ilmeisesti aiemmissa kohteissa nosto on tehty joko nostoliinoilla tilaelementin alta tai nosto-osista tilaelementin päältä. Mitä hyviä ja huonoja puolia näihin nostotapoihin liittyy? Ilmeisesti nostot on tehty aina kohtisuoraan nostopisteistä ylöspäin, ettei nostokulmasta aiheutuisi vaakasuuntaisia rasituksia?
2. Mitkä ovat rakennesuunnittelijan näkökulmasta tilaelementtien noston ongelmakohdat?
3. Minkä ohjeen mukaan tilaelementtien nostot suunnitellaan? Miten dynaamiset vaikutukset huomioidaan, millainen varmuus pitää olla?
4. Mitkä asiat johtavat siihen, että päädytään useampaan nostopisteeseen kuin neljään? Mahtaako nostopisteiden määrällä olla suurta vaikutusta kustannuksiin?
5. Miten kylpyhuone-elementin suurempi paino vaikuttaa tilaelementin noston suunnitteluun?
6. Millaisilla suunnitteluratkaisuilla arkkitehti voi edesauttaa tilaelementin nostoa?

TILAELEMENTTIVALMISTAJIEN EDUSTAJIEN HAASTATTELUT

Kysymysrunko 7:

1. Kuinka suuria ja kuinka painavia tilaelementtejä tuotantolinjallanne voidaan valmistaa? (voi myös antaa sekä suositusmitat että maksimimitat)
2. Minkälaisilla ajoneuvoilla tilaelementtien kuljetus on tehty?
3. Mitkä tuotantoprosessiin liittyvät tekijät tai tuotantolinjan fyysiset ominaisuudet aiheuttavat tai voivat aiheuttaa rajoitteita tilaelementin maksimimitoille? (Esim. ovien koko, nosturin kapasiteetti)
4. Onko elementtituotannossanne automatisoitu joitakin työvaiheita?
5. Vähentävätkö tilaelementtien väliset pienet erot tuotannon tehokkuutta merkittävästi? Esimerkiksi jos tilaelementti on muuten täysin samanlainen, mutta ikkuna on eri kohdassa? Tai jos tilaelementit ovat muuten samanlaisia, mutta eri pituisia?
6. Millaiset suunnitteluratkaisut alentavat tilaelementtien esivalmistusastetta eli millaisia asioita joudutaan jättämään työmaalla tehtäviksi?
7. Mitkä ovat CLT-tilaelementtirakentamisen edut?
8. Mitkä ovat CLT-tilaelementtirakentamisen haasteet?
9. Millaisia suunnitteluun liittyviä ongelmia tilaelementtirakentamiseen liittyy?

LIITE B: CLT-TILAELEMENTTIKERROSTALON RAKENNUSSUUNNITTELUN OHJEKORTTI

Senni Sorri

CLT-TILAELEMENTTIKERROSTALON RAKENNUSSUUNNITTELUOHJE

JOHDANTO

Tämä suunnitteluohje koskee 3-8-kerroksisia puukerrostaloja, joiden kantavana runkona on CLT-tilaelementti ja käyttötarkoituksena asuminen. Suunnitteluohje on suunnattu erityisesti arkkitehdeille luonnossuunnittelun tueksi. Ohjeen tarkoituksena on antaa perustietoja rakennejärjestelmästä ja sen mahdollisuuksista sekä kiinnittää huomio sellaisiin asioihin, jotka ovat tilaelementtikerrostalon kilpailukykyisen toteutettavuuden kannalta keskeisiä.

Tässä suunnitteluohjeessa on pyritty ohjaamaan luonnossuunnittelua kustannustehokkaisiin ratkaisuihin. Myös monet muunlaiset suunnitteluohjeesta poikkeavat ratkaisut ovat toteutettavissa.

Tämä dokumentti on tarkoitettu suuntaa antavaksi ohjeistukseksi luonnossuunnittelua varten. Tekijä ei ota vastuuta esitetyistä ratkaisuista ja niiden sovellettavuudesta yksittäisissä kohteissa. Ohjeella ei voi korvata kohdekohtaisia suunnitelmia, vaan kaikkien suunnitelmien tulee aina perustua pätevän suunnittelijan ratkaisuihin.

SISÄLLYS

1.	CLT.....	4
2.	TILAELEMENTTIRAKENTAMINEN.....	6
3.	CLT-TILAELEMENTIN RAKENNE.....	8
4.	CLT-TILAELEMENTTIKERROSTALON RAKENNE.....	10
5.	PALOTURVALLISUUS.....	14
6.	TILAELEMENTIN KOKO JA MUOTO.....	18
7.	ASUNTOPOHJIEN MUODOSTAMINEN.....	22
8.	KERROSPOHJIEN MUODOSTAMINEN.....	26
9.	AUKOTUS.....	32
10.	JULKISIVUT.....	34

Valokuvat:

s.1 ja s. 38	CrossLam	s. 19	Elementti-Sampo
s. 4	Stora Enso	s. 21	Stora Enso
s. 6	Elementti-Sampo	s. 35	Senni Sorri
s.7	Lauri Lepikonmäki	s. 37	Lauri Lepikonmäki

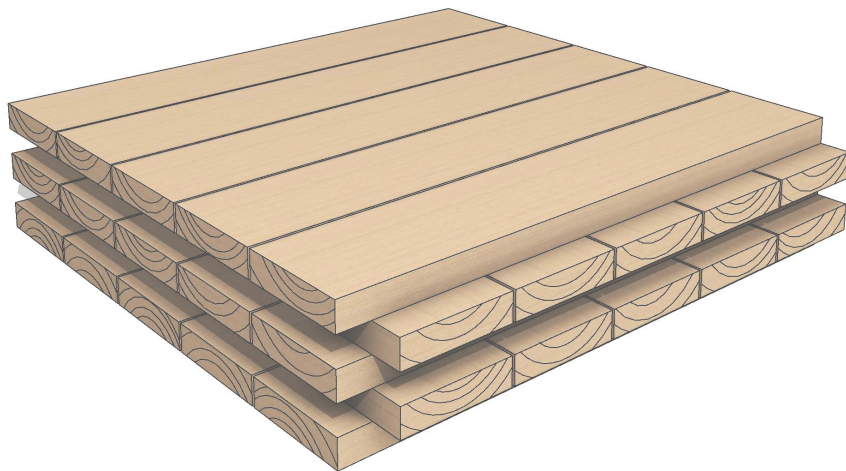
Piirrokset:

Senni Sorri

A close-up photograph of several stacked wooden planks. The image highlights the natural wood grain, which consists of concentric growth rings. Several knots are visible, where the grain of a branch joins the main trunk of the wood. The planks are light-colored, likely a softwood like spruce or fir, and are stacked in a way that shows both the top surface and the side edges. The lighting is even, emphasizing the texture and natural variations of the wood.

CLT—RISTIINLIIMATTU MASSIIVIPUULEVY

CLT-levyn uloimman kerroksen pinnan laatu valitaan sen mukaan, onko CLT tarkoitus jättää näkyväksi pinnaksi vai jääkö se piiloon muiden rakennekerrosten alle. Näkyviin jäävissä levyissä uloin kerros voidaan tehdä laadultaan valikoidusta sahatavarasta, joka asetellaan tiiviisti ilman rakoja.



CLT-levyä voidaan käyttää sekä seinä - että laattarakenteena. CLT-levyihin voidaan työstää aukot, lovet ja reu-
namuodot valmiiksi jo CLT-tehtaalla
ennen levyjen toimitusta tilaele-
menttitehtaalle.

Binderholz	Itävalta						
Vakioleveydet	2400	2600	2750	2950	3200	3500	
Maksimipituus	22 000						
Hoisko CLT	Suomi / Alajärvi						
Vakioleveydet	2400	2700	3000	3300	3500		
Maksimipituus	12 000						
CrossLam	Suomi / Kuhmo						
Vakioleveydet	2500	2600	2700	2800	2900	3000	3100 3200
Maksimipituus	12 000						
Cross Timber Systems	Latvia						
Vakioleveydet	2400	2500	2750	2950	3100		
Maksimipituus	13 800						
MERK Timber	Saksa						
Maksimileveys	4800						
Maksimipituus	20 000						
KLH	Itävalta						
Vakioleveydet	2400	2500	2720	2950			
Maksimipituus	16 500						
Martinsons	Ruotsi						
Leveys	2400-3000						
Maksimipituus	16 000						
Stora Enso	Itävalta						
Vakioleveydet	2450	2750	2950				
Maksimipituus	16 000						

2. TILAELEMENTTIRAKENTAMINEN

Tilaelementtirakentaminen tarkoittaa modulaarista rakentamisen tapaa, jossa rakennus kootaan esivalmistetuista tilakomponenteista. Tavanomaisessa elementtirakentamisessa rakennuskomponentit ovat tasomaisia seinä- ja laattaelementtejä, kun taas tilaelementtirakentamisessa esivalmistus on viety pidemmälle: seinä- ja laattaelementit on yhdistetty jo tehtaalla huonekokonaisuuksiksi tai kokonaisiksi asunnoiksi. Tämä mahdollistaa myös pintamateriaalien, talotekniikan ja kiintokalusteiden asentamisen valmiiksi tilaelementtien sisälle. Tilaelementit kootaan tehtaalla mahdollisimman valmiiksi ennen kuin ne kuljetaan työmaalle. Työmaalla tilaelementit voidaan nostaa suoraan autosta paikalleen, joten rakennuksen pystyttäminen on erittäin nopeaa.

CLT-TILAELEMENTTIRAKENTAMISEN EDUT

CLT-tilaelementtirakentamisen vahvuus on ennen kaikkea teollisessa tuotantotavassa. Rakentamistavalla voidaan saavuttaa mm. seuraavia etuja:

- **Parempi rakentamisen laatu.**

Korkeaa laatutasoa pidetään yleisesti tilaelementtien teollisen valmistustavan merkittävänä etuna. Monia perinteisesti työmaalla tehtäviä työvaiheita saadaan siirrettyä tehdasolosuhteisiin, mikä mahdollistaa paremman laadunvalvonnan ja vakioituneet työvaiheet. Paikallarakentamisen aiheuttamien laatuvirheiden poistaminen tuo säästöjä.

- **Ajansäästö rakentamisprosessissa.**

Tilaelementtirakentamisessa työmaavaihe on lyhyt, sillä pitkälle valmiiksi tehtyjen komponenttien asentaminen on nopeaa. Työmaalla ja tehtaalla tapahtuvia työvaiheita voidaan limittää ja hyödyntää tehdastuotannon parempaa tuottavuutta.

- **Kosteusongelmien välttäminen.**

Pääosa rakentamisesta tapahtuu kuivissa ja lämpimissä tehdasolosuhteissa, joissa kosteudenhallinta on huomattavasti helpompaa kuin paikallarakentamisessa.

- **Ekologisuus.**

Puu on uusiutuva luonnonvara ja kontrolloidussa tehdastuotannossa materiaaleja pystytään käyttämään tehokkaammin. Työmaalla syntyvän rakennusjätteen määrä on pieni.



Tilaelementtikerrostalohankkeen onnistumista edistäviä tekijöitä:

- Tilaelementtien kuljettaminen tontille on liike-teellisesti mahdollista ja taloudellisesti järkevää
- Rakennuskohteessa on paljon toistuvuutta, jolloin pystytään hyödyntämään sarjatuotannon etuja
- Suunnitelmat tehdään alusta alkaen rakennejärjestelmän ehdoilla — ei yritetä sovittaa alun perin toiselle rakennejärjestelmälle suunniteltua kohdetta tilaelementtitekniikkaan
- Suunnitelmissa huomioidaan rakenteellisten, arkkitehtonisten ja taloteknisten ratkaisujen soveltuvuus teolliseen esivalmistukseen

CLT-TILAELEMENTTIRAKENTAMISEN ARKKITEHTONISIA MAHDOLLISUUKSIA

CLT:n materiaaliominaisuudet mahdollistavat joidenkin arkkitehtonisten aiheiden toteuttamisen helpommin kuin betonirakenteella. CLT-tilaelementtitekniikan arkkitehtonisia mahdollisuuksia ovat esimerkiksi seuraavat:

- **Avarat puolilämpimät porrashuoneet.**

CLT-levy on usein jo itsessään niin hyvä lämmöneriste, että porrashuone pystytään toteuttamaan puolilämpimänä tilana ilman paksuja lisäeristeitä. Puolilämpimällä porrashuoneella voidaan säästää rakennuksen lämmityskustannuksissa. Puurakenteisten kerrostasoelementtien asentaminen oheisen kuvan tapaan ”silloiksi” tilaelementtien väliin on myös suhteellisen edullinen tapa toteuttaa asumisviihtyvyyttä ja esteettömyyttä parantava avara porrashuone.

- **Sisäänvedetyt parvekkeet.**

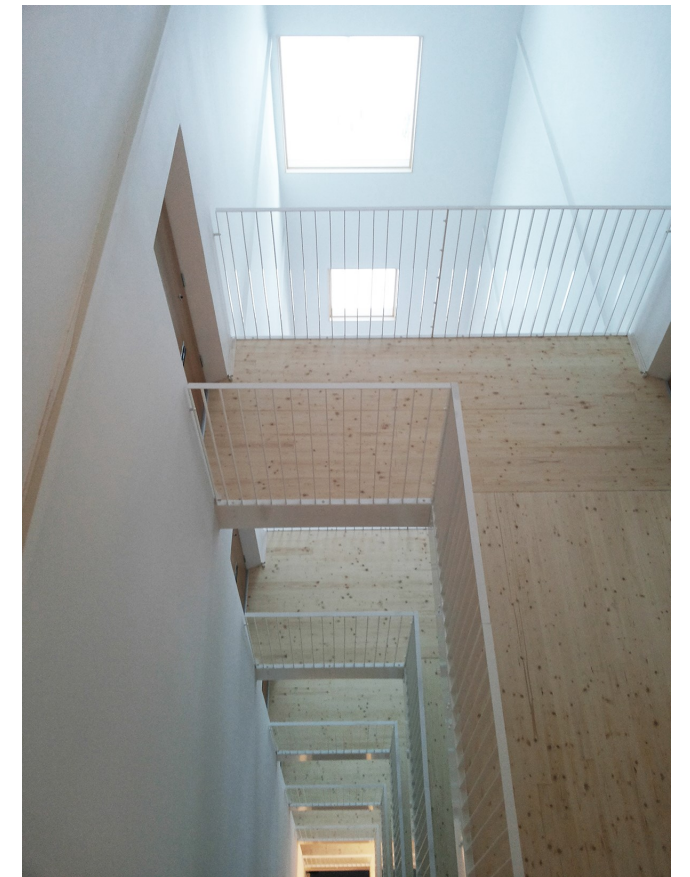
CLT-rakenteessa kylmäsiltojen muodostuminen on vähäistä, joten sisäänvedetyt parvekkeet pystytään toteuttamaan kilpailukykyisemmin kuin betonikerrostaloissa. Päällekkäin asetetut sisäänvedetyt parvekkeet ovat hyvin tilaelementtitekniikkaan soveltuva tapa toteuttaa parvekkeet, sillä ne voidaan rakentaa tilaelementteihin valmiiksi jo tehtaalla.

- **Ulokkeina toimivat tilaelementit.**

Hyvä lämmöneristävyys sekä CLT-rakenteen keveys ja jäykkyys mahdollistavat sen, että tilaelementin pääty voi työntyä ulokkeena ulos julkisivusta. Detaljiikka muodostuu kuitenkin monimutkaiseksi ja tilaelementtien esivalmistusaste laskee, mikäli kylmiä ja lämpimiä tiloja sijoitetaan päällekkäin. Ulokkeet kannattaakin toteuttaa mieluiten parvekkeina, jolloin lämmöneristetty julkisivupinta säilyy suorana.

- **Sisätilojen tunnelma.**

Asukkaiden kokemusten mukaan CLT-talon äänimaailma on pehmeämpi kuin betonikerrostalon. Kohdekohtaisella paloteknisellä tarkastelulla sisätiloihin on mahdollista saada näkyviä puupintoja, mikä tuo tiloihin miellyttävää puun tuntua.



Tilaelementtirakentamisen kannattavuutta parantaa se, jos kaava- ja rakentamismääräykset sallivat seuraavat helpotukset:

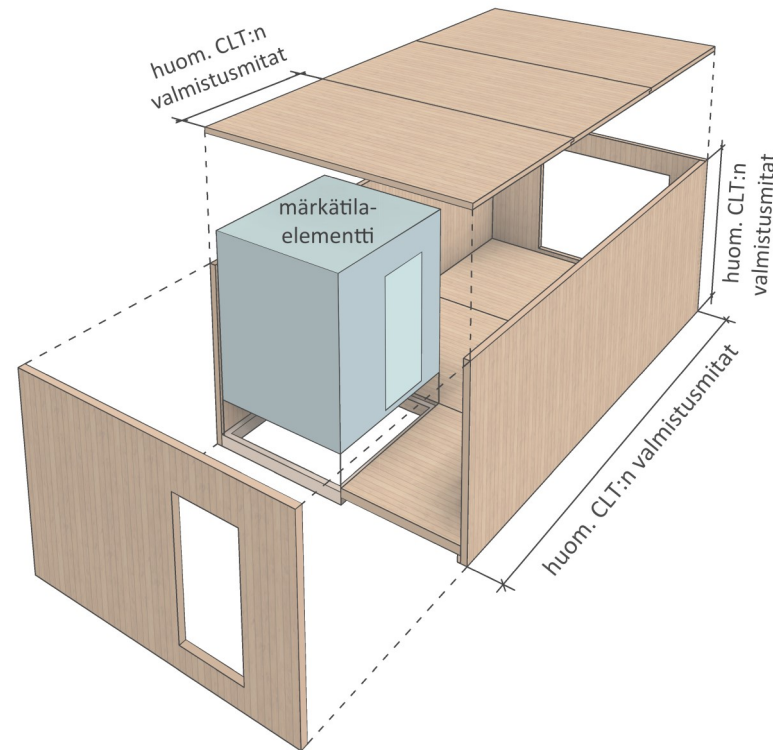
- **Porrashuoneesta lasketaan kerrosalaan mukaan vain tietty pinta-ala.** Tilaelementtirakenteella porrashuoneesta muodostuu usein tavanomaista suurempi. Tämä johtuu talotekniikan pystynousujen keskittämisestä porrashuoneen reunoille sekä tilaelementtien suora-kaidemuodosta, jonka vuoksi porrashuoneen kokoa ei pysty kovin joustavasti muuttamaan asuntojen pohjamuotoa muuttamalla.
- **Huoneistojen välisistä seinistä lasketaan kerrosalaan mukaan vain tietty paksuus.** Tilaelementtikerrostalossa huoneistojen väliset seinät ovat tuplarakenteita, joten rakenteiden osuus kerrosalasta on suurempi kuin tavanomaisessa rakentamisessa.

3. CLT-TILAELEMENTIN RAKENNE

Yksi tilaelementti sisältää yleensä puolikkaan tai kokonaisen asunnon. Asunnon pintojen viimeistelyt, kiintokalusteet ja talotekniikka tehdään tehtaalla niin valmiiksi kuin mahdollista. CLT-rakenne poikkeaa tavanomaisesta puurakenteesta siinä, että sama rakennustuote toimii samanaikaisesti useassa eri tehtävässä. CLT-levy toimii yhtä aikaa kantavana runkona, jäykistävänä levynä, höyryn- ja ilmansulkuna sekä osaltaan myös lämmöneristeenä. Toisinaan CLT toimii myös valmiina sisäpintana. Tavanomaisessa rankarakenteessa nämä toiminnot on eriytetty eri rakennustuotteille.

TILAELEMENTIN CLT-RUNKO

CLT-tilaelementti on useimmiten suorakaiteen muotoinen, laatikkomainen rakennuskomponentti, jossa kantavat seinät ovat pitkillä sivuilla. Tilaelementin CLT-runko muodostuu seinä-, lattia- ja kattolevyistä, jotka kiinnitetään toisiinsa mekaanisin kiinnikkein. Tilaelementin CLT-runko muodostaa asunnon ympärille tiiviin vaipan ja sen toimiminen rakenteen ilman- ja höyrynsulkuna varmistetaan levyjen välisten liitosten tiivistämisellä. Liitokset voidaan tiivistää tapauksesta riippuen esimerkiksi höyrynsulkuteipillä, saumanauhalla tai saumaussmassalla.



Aukot, reunamuodot ja tarvittavat loveukset työstetään levyihin valmiiksi jo CLT-tehtaalla, joten tilaelementtitehtaalle saavuttuaan levyt eivät juurikaan vaadi enää työstämistä. Kukin seinä pyritään tekemään yhdestä kokonaisesta levystä. Lattia ja katto voidaan tehdä yhdestä kokonaisesta CLT-levystä silloin, kun CLT:n valmistusmitat ovat siihen riittävät. Useimmiten tilaelementti on kuitenkin CLT:n valmistusleveyttä leveämpi, jolloin lattia ja katto joudutaan koostamaan useasta rinnakkaisesta levystä.

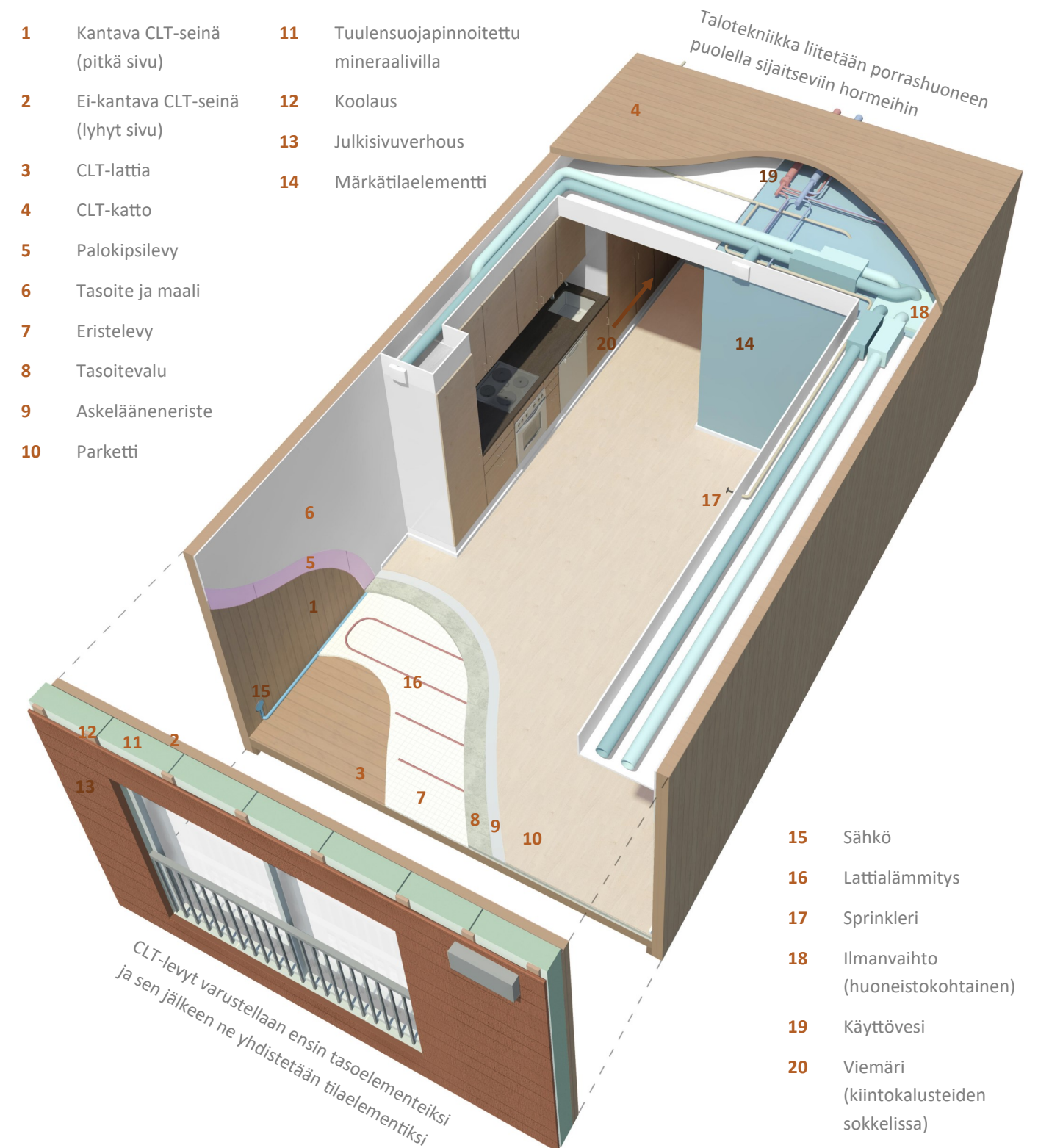
TILAELEMENTTIEN VALMISTUS

Tilaelementtitehtaalla CLT-levyt varustellaan ensin lattia-, katto- ja seinäelementeiksi lisäämällä mm. eristeet, levytykset, koolaukset ja julkisivuverhoukset. Lisäksi valmistetaan kevyet väliseinäelementit, joissa ei yleensä käytetä CLT:tä. Valmiit seinä- ja laattaelementit yhdistetään tilaelementiksi ja sen jälkeen tehdään talotekniikan asennukset ja alakatot, CLT-lattian päälle tulevat pintakerrokset ja lattiavalut, pintamateriaalien asennukset ja pintakäsittelyt sekä ovien ja listojen asennukset. Tilaelementteihin asennetaan myös kiintokalusteet mahdollisimman valmiiksi.

Asunnon märkätilat voidaan rakentaa alusta alkaen tehtaalla tai toteuttaa valmiilla märkätilaelementeillä. Märkätilaelementti voidaan asentaa tilaelementin sisään siinä vaiheessa kun tasoelementit yhdistetään tilaelementiksi. Märkätilaelementti on yleisin tapa toteuttaa CLT-tilaelementtikerrostalon märkätilat.

- 1 Kantava CLT-seinä (pitkä sivu)
- 2 Ei-kantava CLT-seinä (lyhyt sivu)
- 3 CLT-lattia
- 4 CLT-katto
- 5 Palokipsilevy
- 6 Tasoite ja maali
- 7 Eristelevy
- 8 Tasoitevalu
- 9 Askelääneneriste
- 10 Parketti

- 11 Tuulensuojapinoitettu mineraalivilla
- 12 Koolaus
- 13 Julkisivuverhous
- 14 Märkätilaelementti



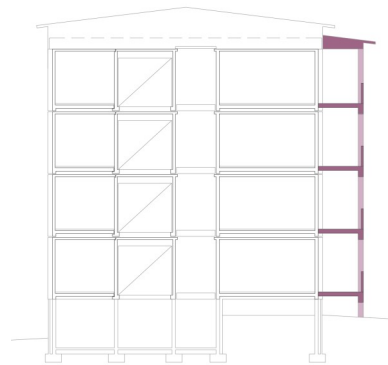
- 15 Sähkö
- 16 Lattialämmitys
- 17 Sprinkleri
- 18 Ilmanvaihto (huoneistokohtainen)
- 19 Käyttövesi
- 20 Viemäri (kiintokalusteiden sokkelissa)

TALOTEKNIikka

Tilaelementtitekniikka tarjoaa mahdollisuuden korkeampaan esivalmistusasteeseen kuin perinteinen elementtitekniikka. Erityisesti tämä näkyy talotekniikassa. Lattialämmitys, ilmanvaihto, sähköasennukset, sprinkleriputket, vesijohdot, vesikalusteet ja talotekniset laitteet pyritään asentamaan tilaelementteihin mahdollisimman valmiiksi jo tehtaalla, jolloin työmaalla tehtäväksi jää vain järjestelmien yhdistäminen rajapinnoissa. Tilaelementtitekniikan etu on myös se, että talotekniikan piilottaminen alakattojen ja pintarakenteiden taakse voidaan tehdä jo tehtaalla. Talotekniikan liitoskohdissa ympäröivät rakenteet joudutaan kuitenkin jättämään auki, jotta liitokset pystytään tekemään tilaelementtien asennuksen jälkeen.

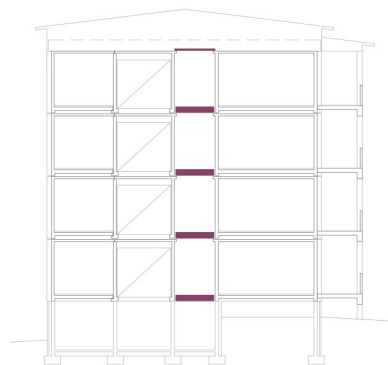
4. CLT-TILAELEMENTTIKERROSTALON RAKENNE

CLT-tilaelementtikerrostalo muodostuu erillisistä, vierekkäin ja päällekkäin asetetuista tilayksiköistä. Tilaelementit kiinnitetään toisiinsa yleensä teräsosilla sekä pysty- että vaakasuunnassa. Toisiinsa kytketyt tilaelementit muodostavat rakennuksen kantavan ja jäykistävän rungon, eikä erillistä runkorakennetta siten tarvita. Jokaisella tilaelementillä on itsenäiset seinä-, lattia- ja kattorakenteet, minkä seurauksena huoneistojen väliset rakenteet ovat tuplarakenteita. Tilaelementtien lisäksi kerrostaloon tarvitaan myös muita rakenteita: perustukset, parvekerakenteet, porrashuoneen rakenteet ja vesikatto.



PARVEKKEET

Tilaelementtikerrostalon parvekkeet voidaan toteuttaa monella eri tavalla. Korkeaan esivalmistusasteeseen päästään sisäänvedetyillä parvekkeilla, jotka voidaan tehdä tilaelementteihin valmiiksi jo tehtaalla. Ulokeparvekkeet voidaan toteuttaa joko erillisillä parveke-elementeillä tai julkisivupinnasta ulos työntyvillä tilaelementin päädyillä. Parvekkeet voidaan myös toteuttaa tavanomaiseen tapaan ulkopuolisella pilari- tai seinäkannatuksella.



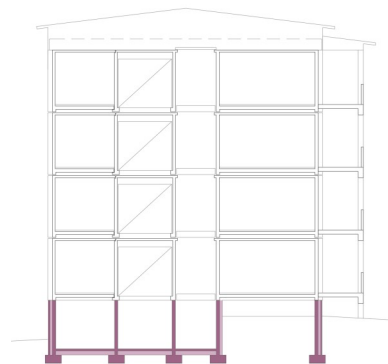
PORRASHUONE

Tilaelementtikerrostalon kerrospohja muodostuu useimmiten porrashuoneen ympärille jäsenellyistä tilaelementeistä. Porrashuone voidaan toteuttaa jättämällä tilaelementtien keskelle kuilu. Porrassyöksyt ja kerrostasoelementit kannatellaan kuilua ympäröivien tilaelementtien rakenteista, joten porrashuoneelle ei tarvitse rakentaa erillisiä kantavia rakenteita. Jos porrashuoneessa on ulkoilmaan rajautuvia seiniä, ne voidaan toteuttaa suurelementeillä.

CLT-tilaelementtikerrostalon kustannustehokkaan toteutettavuuden kannalta on tärkeää, että kaikki talotekniikan pystynousut keskitetään porrashuoneeseen. Sijoittamalla hormit porrashuoneeseen saavutetaan useita etuja: ääni- ja palotekniisesti haastavat välipohjalävistyksiset saadaan vältettyä huoneistoissa, talotekniikan huoltaminen ja tarkastaminen on porrashuoneen puolelta helpompaa, viemärimelun haitat vähenevät ja järjestelmien yhdistäminen ja pystynousujen rakentaminen pystytään tekemään omana työvaiheenaan rungon pystyttämisen jälkeen.

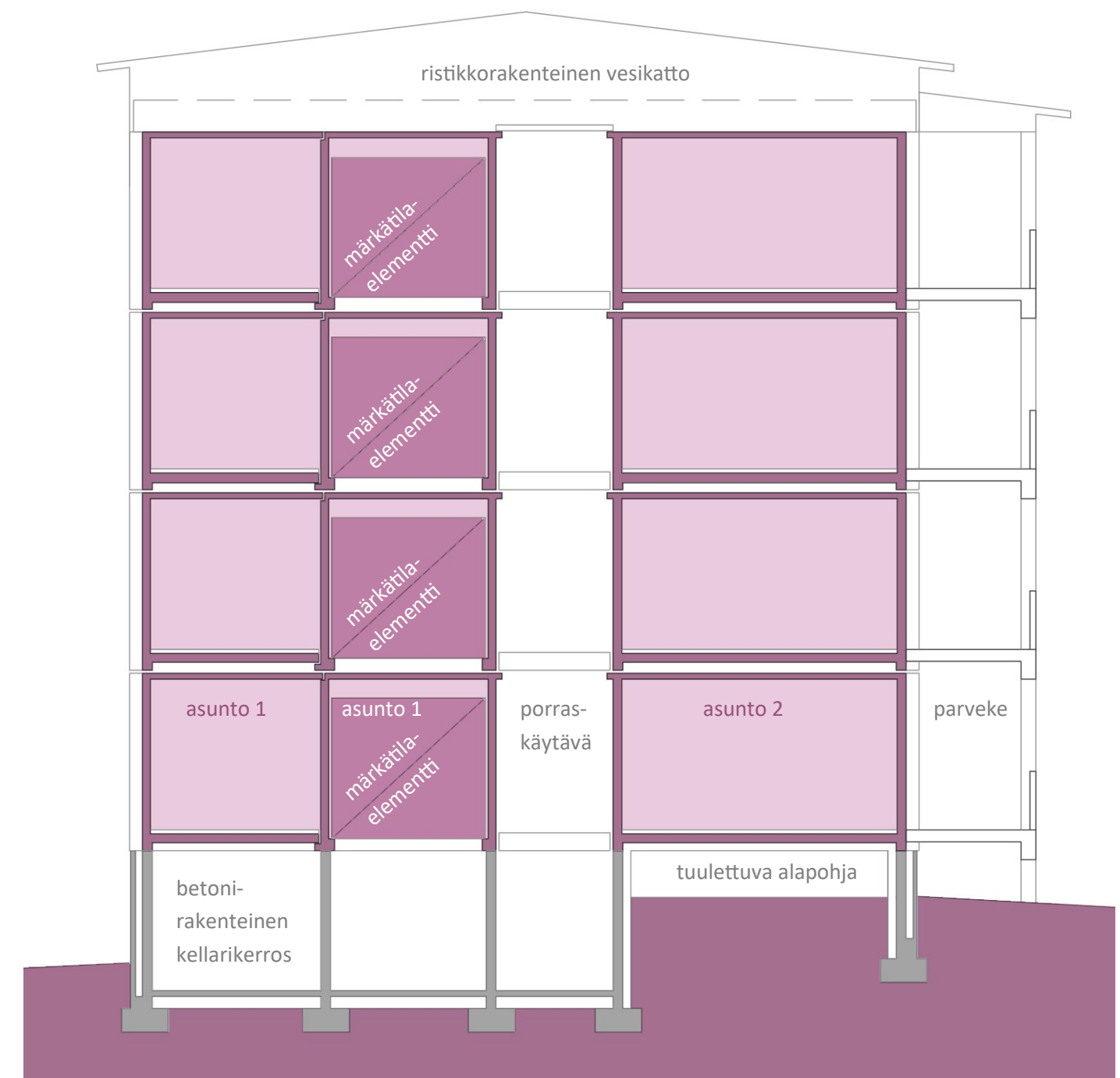
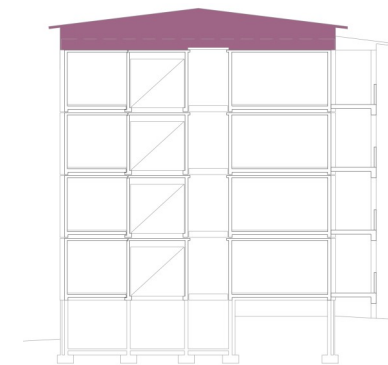
KELLARIKERROS JA PERUSTUKSET

Tilaelementtikerrostalon alin kerros tehdään usein betonirakenteisena. Betonikerros voi olla joko maanpäällinen kerros tai kellarikerros ja siihen voidaan sijoittaa esimerkiksi asuntoja palvelevia yhteistiloja, teknisiä tiloja sekä tarvittaessa väestönsuojatilat. Tilaelementtikerrostalossa kantavia seiniä on tiheämmin kuin tavanomaisessa betonikerrostalossa, joten on huomioitava, että myös kellarikerrokseen tulee kantavia linjoja tavanomaista tiheämmin. Mikäli tilaelementtien alapuolelle ei tehdä betonikerrosta, asennetaan ensimmäiset tilaelementit suoraan sokkelin päälle ja toteutetaan alapohja tuulettuvana.



VESIKATTO

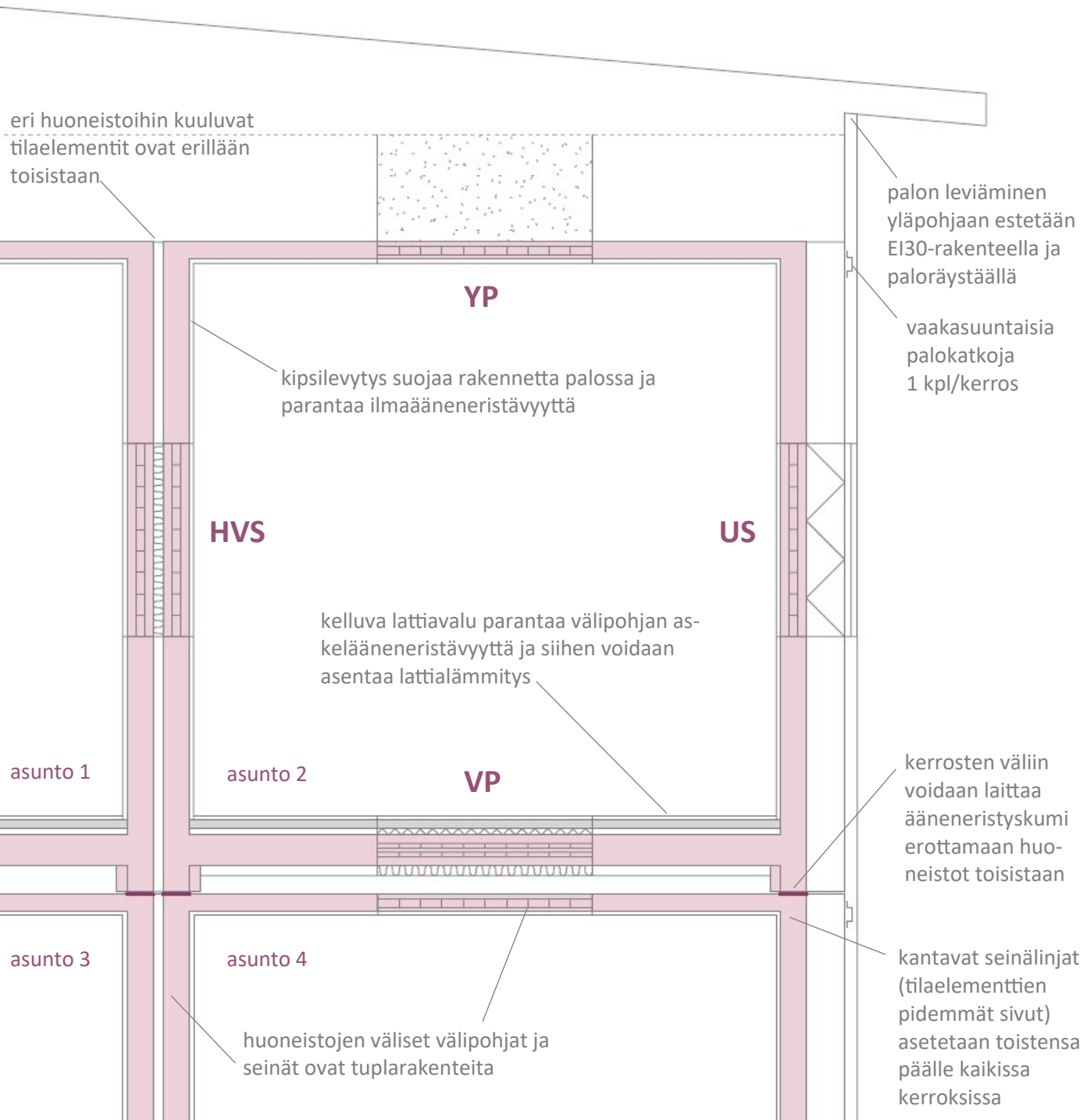
Tilaelementtikerrostalon vesikatto tehdään yleensä ristikkorakenteisena ulkopuolisella vedenpoistolla. Kattorakenne tuetaan tilaelementtien kantaviin seinälinjoihin. Vesikaton asennusta voidaan nopeuttaa yhdistämällä rakenteet kattoelementeiksi, jolloin vesikatto voidaan nostaa tilaelementtien päälle valmiina lohkoina. Periaatteessa olisi myös mahdollista kiinnittää vesikattorakenteet valmiiksi ylimmän kerroksen tilaelementteihin, mutta silloin tilaelementin kokonaiskorkeus voi muodostua kuljetuksen kannalta ongelmalliseksi.



TILAELEMENTTIEN VÄLISET RAKENTEET

Akustisilla ratkaisuilla on merkittävä vaikutus CLT-tilaelementtirakennuksen suunnitteluun. Rakenteellisista syistä tilaelementit olisi hyvä kiinnittää toisiinsa mahdollisimman jäykästi, mutta akustisista syistä taas mahdollisimman pehmeästi. Akustiikan peruseriäitä ovat tuplarakenteet eri huoneistojen välillä sekä tilaelementtirungon eristäminen ympäröivistä rakenteista. Vaakasunnassa eri huoneistoihin kuuluvat tilaelementit voidaan erottaa toisistaan eristävällä ja pystysunnassa esimerkiksi ääneneristyskumeilla. Toisaalta tilaelementit täytyy myös kiinnittää toisiinsa pysty- ja vaakasunnassa. Akustisista syistä kiinnitysosien määrää pyritään minimoimaan.

Välipohjarakenteen riittävän äänenerityksen saavuttamiseksi lattiarakenteen päälle voidaan valaa kelluva lattiavalu, joka toimii tarvittaessa myös lattian paloteknisenä suojaverhouksena. Seinä- ja kattopinnoissa suojaverhouk- ja ääneneristysvaatimukset saadaan täytettyä kipsilevyverhouksilla. Suojaverhoukvaatimukset esitellään tarkemmin luvussa 5.



RAKENNETYYPI

Ohessa on esitetty joitakin CLT-tilaelementtikerrostalon tavanomaisia rakennetyyppejä, joita voidaan käyttää luonnossuunnittelun apuna, mikäli tarkempaa tietoa ei ole vielä saatavilla. Välipohjarakenteelle on annettu kaksi vaihtoehtoa, joista toisessa lattia on CLT-rakenteinen ja toisessa palkkirakenteinen. Sulkuihin on merkitty, minkä suojaverhoukvaatimuksen rakennekerros täyttää.

VP	CLT-rakenteinen	VP	Palkkirakenteinen
	pintamateriaali		pintamateriaali
40 mm	lattiavalu (K ₂ 30)	40 mm	lattiavalu (K ₂ 30)
30 mm	askeläääneneristelevy	30 mm	askeläääneneristelevy
100—180 mm	CLT (taulukon mukaan)	15-18 mm	OSB-levy
50 mm	ääneneriste	200-300 mm	lattiapalkkisto + ääneneriste
	ilmaväli		ilmaväli
80—100 mm	CLT	80—100 mm	CLT
15/18 mm	palokipsilevy (K ₂ 10 / K ₂ 30)	15/18 mm	palokipsilevy (K ₂ 10 / K ₂ 30)

US		HVS	
15/18 mm	palokipsilevy (K ₂ 10 / K ₂ 30)	26 mm	2 x 13 mm kipsilevy (K ₂ 30)
100—120 mm	CLT	100—120 mm	CLT
180 mm	tuulensuojapinnoitettu mineraalivilla	50 mm	ääneneriste
32 mm	tuuletusrako/koolaus	100—120 mm	CLT
28 mm	ulkoverhoukpaneeli	26 mm	2 x 13 mm kipsilevy (K ₂ 30)

YP	
500 mm	puhallusvilla
80—100 mm	CLT
15/18 mm	palokipsilevy (K ₂ 10 / K ₂ 30)

5. PALOTURVALLISUUS

Suomen rakentamismääräyskokoelman osan E1 (2011) perusteella on mahdollista rakentaa puukerrostalo aina kahdeksaan kerrokseen asti paloluokassa P2. Puun käyttöön runko- ja julkisivumateriaalina on kuitenkin liitetty erityismääräyksiä, jotka koskevat sekä aktiivisia että passiivisia palontorjuntamenetelmiä. Rakenteellinen suojaus on passiivista palontorjuntaa, kun taas automaattiset sammutuslaitteistot ja paloilmaisimet ovat aktiivisia palontorjuntamenetelmiä. Puukerrostalojen paloturvallisuussuunnittelu poikkeaa tavanomaisesta asuinkerrostalorakentamisesta erityisesti suojaverhousvaatimusten, rakennustarvikeluokkavaatimusten ja automaattisten sammutuslaitteistojen osalta.

AUTOMAATTINEN SAMMUTUSLAITTEISTO

Kaikki 3-8-kerroksiset puukerrostalot tulee varustaa automaattisella sammutuslaitteistolla. 3-4-kerroksisessa talossa riittää SFS-5980 -standardin 2-luokan vaatimustason mukainen sprinkleri. 5-8-kerroksisessa puukerrostalossa sprinkleriltä edellytetään SFS-EN 12845 -standardin OH-luokan vaatimustasoa. Yleensä rakentamismääräyskokoelmassa sallitaan lievennyksiä taulukkoarvoihin silloin, kun rakennuksessa käytetään aktiivisia palontorjuntamenetelmiä. P2-luokan puukerrostaloissa lievennyksiä ei kuitenkaan ole mahdollista saada tällä perusteella.

RAKENTEIDEN SUOJAVERHOUKSET JA PINTALUOKAT

Puukerrostaloissa edellytetään puurungon suojaamista suojaverhouksilla. Lisäksi asetetaan vaatimuksia näkyviin jäävien pintojen rakennustarvikeluokille. Viereisen sivun taulukkoon on koottu CLT-tilaelementtikerrostalon pinta-luokka- ja suojaverhousvaatimukset porrashuoneessa ja asunnoissa Suomen rakentamismääräyskokoelman osan E1 (2011) mukaisesti. Taulukossa on myös esitetty esimerkit siitä, millaisella rakennustuotteella on mahdollista täyttää asetettu vaatimus. Pääsääntöisesti CLT-pintoja ei voi jättää näkyväksi pinnaksi, mutta suojaverhouksen päälle voi yleensä tehdä erillisen puuverhouksen.

TAULUKKOARVOISTA POIKKEAMINEN

Koko rakennukselle tai sen osalle voidaan tehdä oletettuun palonkehitykseen perustuva toiminnallinen paloturvallisuussuunnittelu, jonka avulla aktiivisten palontorjuntamenetelmien vaikutus pystytään huomioimaan tarkemmin. Toiminnallinen paloturvallisuussuunnittelu voi mahdollistaa myös yli 8-kerroksisten puukerrostalojen rakentamisen. Rakentamismääräyskokoelman taulukoihin ja määräyksiin on mahdollista tehdä poikkeuksia myös kohdekohtaisen asiantuntijalausunnon perusteella.

	3 - 4 KERROSTA (2-luokan sprinkleri)		5 - 8 KERROSTA (OH-luokan sprinkleri)	
PORRASHUONE	Suojaverhous	Näkyvä pinta	Suojaverhous	Näkyvä pinta
Seinä- ja kattopinnat	K ₂ 10 / A2-s1, d0	A2-s1, d0	K ₂ 30 / A2-s1, d0	A2-s1, d0
Esimerkkimateriaali	Kipsilevy	Kipsilevy	Kipsilevy	Kipsilevy
Lattiapinnat	-	D _{FL} -s1	K ₂ 30 / A2-s1, d0	D _{FL} -s1
Esimerkkimateriaali	Muovimatto		Valulattia	Muovimatto
Porrarakenteet (poislukien askelmapinnat)	K ₂ 30 / A2-s1, d0	A2-s1, d0	K ₂ 30 / A2-s1, d0	A2-s1, d0
Esimerkkimateriaali	Kipsilevy	Kipsilevy	Kipsilevy	Kipsilevy

ASUNNOT	Suojaverhous	Näkyvä pinta	Suojaverhous	Näkyvä pinta
Kevyet väliseinät	K ₂ 10 / A2-s1, d0	B-s1, d0*	-	D-s2, d2
Esimerkkimateriaali	Kipsilevy	Kipsilevy	Kipsilevy, puu	
Saunan seinäpinnat	K ₂ 10 / A2-s1, d0	D-s2, d2	K ₂ 30 / A2-s1, d0	D-s2, d2
Esimerkkimateriaali	Kuitusementtilevy	Puupaneeli	Kuitusementtilevy	Puupaneeli
Saunan kattopinta	K ₂ 10 / A2-s1, d0	D-s2, d2	K ₂ 30 / A2-s1, d0	D-s2, d2
Esimerkkimateriaali	Kuitusementtilevy	Puupaneeli	Kuitusementtilevy	Puupaneeli
Muut seinä- ja kattopinnat	K ₂ 10 / A2-s1, d0	B-s1, d0*	K ₂ 30 / A2-s1, d0	D-s2, d2
Esimerkkimateriaali	Kipsilevy	Kipsilevy	Kipsilevy	Kipsilevy, puupaneeli
Kaikki lattiapinnat	-	-	K ₂ 30 / A2-s1, d0	-
Esimerkkimateriaali			Valulattia	

* D-s2, d2 (puu), mikäli asunnossa on OH-luokan sprinklaus

PUUJULKISIVUN PALOTURVALLISUUS

Puujulkisivuisissa puukerrostaloissa edellytetään tuuletusraon sisäpinnan suojaverhousta. Suojaverhous ja materiaalin luokkavaatimus voidaan täyttää esimerkiksi tarkoitukseen sopivalla tuulensuojapinnoitetulla mineraalivillalla. Alla olevaan taulukkoon on koottu julkisivujen suojaverhouksille ja rakennustarvikeluokille asetetut vaatimukset. Maantasokerroksessa ja uloskäytävinä tai varateinä toimivien aukkojen kohdalla verhouslaudat tulee suojata lemminpuolisella palosuojakäsittelyllä. Tämä vaatimus koskee esimerkiksi varateinä toimivien parvekkeiden taustalla olevia julkisivun osia. Palosuojakäsittely saattaa muuttaa varsinkin kuultokäsitellyn puupinnan ulkonäköä, mikä on huomioitava kokonaisuuden suunnittelussa. Vaatimukset voidaan myös täyttää käyttämällä näissä kohdissa jotakin muuta materiaalia, kuten toteuttamalla maantasokerros betonirakenteisena.

	3 - 4 KERROSTA (2-luokan sprinkleri)		5 - 8 KERROSTA (OH-luokan sprinkleri)	
JULKISIVUT YLEENSÄ	Suojaverhous	Pinta	Suojaverhous	Pinta
Tuuletusraon sisäpinta	K ₂ 10 / A2-s1, d0	B-s1, d0	K ₂ 30 / A2-s1, d0	B-s1, d0
Esimerkkimateriaali	Tuulensuoja-mineraalivilla	Tuulensuoja-mineraalivilla	Tuulensuoja-mineraalivilla	Tuulensuoja-mineraalivilla
Verhouksen sisä- ja ulkopinta	-	D-s2, d2	-	D-s2, d2
Esimerkkimateriaali	Puuverhous		Puuverhous	

JULKISIVUT MAANTASOKERROKSEN JA ULOSKÄYTÄVINÄ/VARATEINÄ TOIMIVIEN AUKKOJEN KOHDALLA	Suojaverhous	Pinta	Suojaverhous	Pinta
Tuuletusraon sisäpinta	K ₂ 10 / A2-s1, d0	B-s1, d0	K ₂ 10 / A2-s1, d0	B-s1, d0
Esimerkkimateriaali	Tuulensuoja-mineraalivilla	Tuulensuoja-mineraalivilla	Tuulensuoja-mineraalivilla	Tuulensuoja-mineraalivilla
Verhouksen sisä- ja ulkopinta	-	B-s2, d0	-	B-s2, d0
Esimerkkimateriaali	Palosuojakäsitelty puu		Palosuojakäsitelty puu	

PARVEKKEIDEN SUOJAVERHOUKSET

Puisilta parvekerakenteilta edellytetään suojaverhousta, jonka rakennustarvikeluokka on A2-s1, d0. Säälle alttiiden puurakenteiden verhoaminen esimerkiksi kipsilevyillä on kuitenkin osoittanut kosteusteknisesti ongelmalliseksi. Yhtenä vaihtoehtona on esitetty parvekkeiden suojaverhousten korvaamista sprinklauksella. Tämä onkin hyväksytty ratkaisuksi useassa Suomeen rakennetussa CLT-tilaelementtikerrostalossa. Lisätietoa löytyy Puuinfon teknisestä tiedotteesta ”Parveke ja luhtikäytävä (3-8/P2)”.

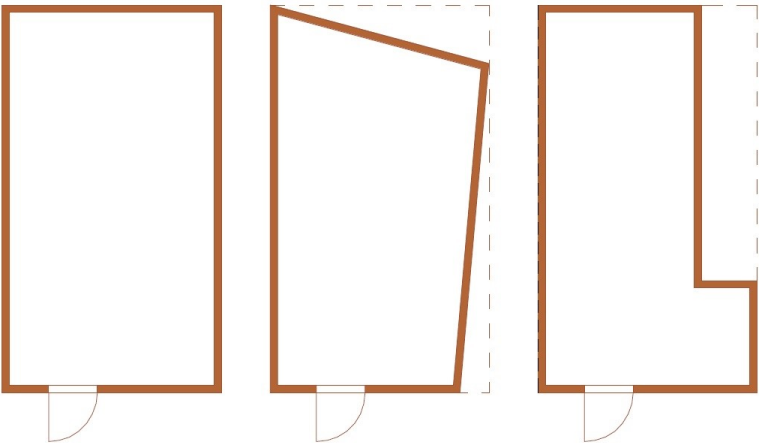
PUUVERHOILTUJA KERROSTALOJA KOSKEVAT LISÄMÄÄRÄYKSET

Lisäksi Rakentamismääräyskokoelman osa E1 (2011) antaa puujulkisivuisille kerrostaloille lisämääräyksiä, joilla pyritään rajoittamaan palon leviämistä ulkokautta. Puukerrostaloon voidaan tehdä puuverhoiltu julkisivu, mikäli seuraavat ehdot täyttyvät:

- Palon leviäminen tuuletusraossa on rajoitettu vähintään kerroksittain riittävän tehokkaasti.** Palon leviäminen pystytään hidastamaan tuuletusrakoon asennettavilla palokatkoilla. Vaakasuuntaisia palokatkoja tulee olla 1 kpl kerrosta kohti. Niiden lisäksi tarvitaan myös pystysuuntaiset tiiviisti asennetut koolauspuut, jotka jakavat tuuletusraon noin 600 mm:n kaistoihin.
- Palon leviäminen vaakasuunnassa porrashuoneen ulkoseinän tuuletusrakoon on estetty.**
- Palon leviäminen julkisivusta ullakkoon ja yläpohjaan on estetty EI30-rakenteella.** Palon leviäminen estetään paloräystäsrakenteella sekä ullakon ja yläpohjan ontelon vastaisen seinän osastoivuudella. Paloräystäs voidaan toteuttaa räystään alapinnassa olevalla osastoivalla levyllä.
- Julkisivurakenteen laajojen osien putoaminen palon sattuessa on riittävästi estetty.**
- Rakennuksia tai rakennelmia ei sijoiteta alle 8 metrin etäisyydelle julkisivusta, jollei rakenteellisin tai muin keinoin estetä palon leviämistä julkisivuun.**

6. TILAELEMENTIN KOKO JA MUOTO

Tilaelementtien sopivan koon ja muodon määrittäminen on kustannusten kannalta olennaista. Tilaelementin kokoa rajoittavat tehdasvalmistuksen, kuljetettavuuden ja nostettavuuden asettamat vaatimukset. Tuotantolinjan rajoitteet ja CLT-levyjen valmistusmitat vaikuttavat elementtien maksimikokoon. Lisäksi kuljetuksen mittarajat ja taloudellisuus asettavat omat reunaehdonsa tilaelementin koolle. Tilaelementin koon määrittämisessä on myös huomioitava se, että sitä käsitellään nostamalla sekä tehtaalla että työmaalla, joten se ei saa myöskään olla liian painava.

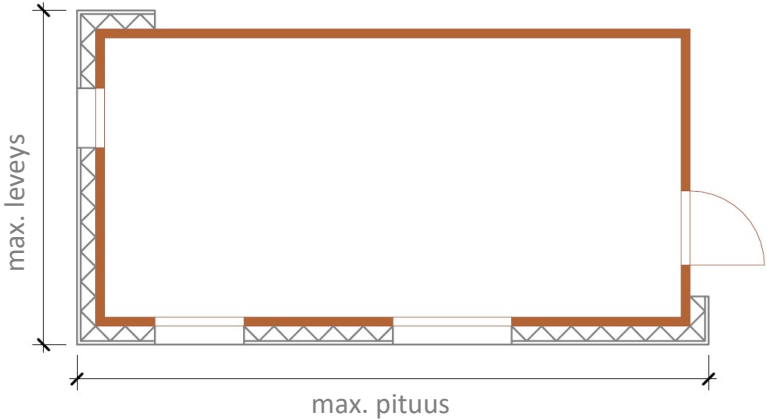


TILAELEMENTIN MUOTO

Tilaelementin perusmuoto on suorakulmainen särmiö, sillä se on kuljetuksen, käsittelyn ja valmistuksen kannalta helpoin muoto. Tilaelementti voi olla muunkin muotoinen, mutta sen äärimittojen tulee täyttää valmistuksen ja kuljetuksen asettamat ehdot. Perusmuodosta poikkeaminen nostaa kuitenkin tilaelementin kustannuksia. Pohjamuodossa olevat ulokkeet voivat myös hankaloittaa tilaelementin nostoa.

VALMISTUKSEN MITTARAJOITTEET

Alla olevaan taulukkoon on koottu joidenkin valmistajien ilmoittamia tilaelementtien maksimimittoja. Huomaa kuitenkin, että taulukon mukaisten maksimimittaisten tilaelementtien käyttäminen ei yleensä ole kuljetuksen kannalta taloudellinen ratkaisu. Lisäksi esimerkiksi seinälevyn korkeutta ja pituutta voi rajoittaa käytettävän CLT-levyn valmistuskorkeus. Tilaelementin sopiva koko on tärkeä lähtötieto suunnittelulle, joten se tulisi määrittää ennen suunnittelun aloitusta.



Valmistaja	Pituus	Leveys	Korkeus	Paino
Elementti Sampo Oy	12 m	5,5 m	3,2 m	16 tn
Pyhännän Rakennustuote Oy	12 m	5,2 m	3,3 m	20 tn

TILAELEMENTIN KULJETUS

Tilaelementtien maantiekuljetukset ovat erikoiskuljetuksia, sillä tilaelementin leveys ylittää käytännössä aina normaalikuljetuksen mittarajan. Erikoiskuljetuksissa tulee varmistaa, ettei kuljetusreitillä ei ole sellaisia tien yläpuolisia rakenteita, joihin kuljetus saattaisi osua. Erikoiskuljetuksissa tulee myös noudattaa erikoiskuljetuksen merkitsemisestä ja varoitustoimenpiteistä annettuja määräyksiä.

Varoitustoimenpiteet ja kuljetuksen luvanvaraisuus riippuvat kuljetuksen pituudesta, leveydestä ja korkeudesta. Tilaelementtien tapauksessa kuljetuksen korkeus ja pituus jäävät yleensä niin pieniksi, etteivät ne edellytä varoitustoimenpiteitä. Varoitustoimenpiteet määräytyvät käytännössä siis tilaelementin leveyden mukaan. Alla olevasta taulukosta nähdään, että varoitustoimenpiteet ovat raskaampia silloin, kun tilaelementin leveys ylittää 4 metriä.

Tilaelementin leveys	Varoitusautoja edessä	Varoitusautoja takana	Liikenteen ohjaajia
≤ 3,5 m	0	0	0
≤ 4,0 m	1	0	0
≤ 5,0 m *	1	1	2
≤ 7,0 m *	2	1	3

* vaatii erikoiskuljetusluvan



TILAELEMENTIN PAINO

Tilaelementin painon on oltava sellainen, että tilaelementtiä pystytään käsittelemään nostamalla sekä tehtaalla että työmaalla. Tilaelementit olisi hyvä suunnitella keskenään suunnilleen saman painoisiksi, jotta yhden painavan tilaelementin takia ei tarvitsisi hankkia työmaalle kapasiteetiltaan suurempaa nostokalustoa. Märkätilan paino neliötä kohti on huomattavasti kuivia tiloja suurempi, joten märkätiloja sisältävät tilaelementit tulisi suunnitella kooltaan pienemmiksi kuin pelkkiä kuivia huonetiloja sisältävät tilaelementit. Oheisen taulukon yksinkertaistettujen kaavojen avulla voidaan alustavasti arvioida tilaelementin painoa.

	CLT-seinät 100 mm	CLT-seinät 120 mm
CLT-lattia 100 mm (tilaelementin leveys n. 3,0 m)	$K \cdot 210 \text{ kg/m}^2 + M \cdot 500 \text{ kg/m}^2 + S \cdot H \cdot 80 \text{ kg/m}^2$	$K \cdot 210 \text{ kg/m}^2 + M \cdot 500 \text{ kg/m}^2 + S \cdot H \cdot 90 \text{ kg/m}^2$
CLT-lattia 120 mm (tilaelementin leveys n. 3,5 m)	$K \cdot 220 \text{ kg/m}^2 + M \cdot 500 \text{ kg/m}^2 + S \cdot H \cdot 80 \text{ kg/m}^2$	$K \cdot 220 \text{ kg/m}^2 + M \cdot 500 \text{ kg/m}^2 + S \cdot H \cdot 90 \text{ kg/m}^2$
CLT-lattia 140 m (tilaelementin leveys n. 4,0 m)	$K \cdot 230 \text{ kg/m}^2 + M \cdot 500 \text{ kg/m}^2 + S \cdot H \cdot 80 \text{ kg/m}^2$	$K \cdot 230 \text{ kg/m}^2 + M \cdot 500 \text{ kg/m}^2 + S \cdot H \cdot 90 \text{ kg/m}^2$
CLT-lattia 160 mm (tilaelementin leveys n. 4,5 m)	$K \cdot 240 \text{ kg/m}^2 + M \cdot 500 \text{ kg/m}^2 + S \cdot H \cdot 80 \text{ kg/m}^2$	$K \cdot 240 \text{ kg/m}^2 + M \cdot 500 \text{ kg/m}^2 + S \cdot H \cdot 90 \text{ kg/m}^2$
CLT-lattia 180 mm (tilaelementin leveys n. 5,0 m)	$K \cdot 250 \text{ kg/m}^2 + M \cdot 500 \text{ kg/m}^2 + S \cdot H \cdot 80 \text{ kg/m}^2$	$K \cdot 250 \text{ kg/m}^2 + M \cdot 500 \text{ kg/m}^2 + S \cdot H \cdot 90 \text{ kg/m}^2$
Palkkilattia	$K \cdot 190 \text{ kg/m}^2 + M \cdot 500 \text{ kg/m}^2 + S \cdot H \cdot 80 \text{ kg/m}^2$	$K \cdot 190 \text{ kg/m}^2 + M \cdot 500 \text{ kg/m}^2 + S \cdot H \cdot 90 \text{ kg/m}^2$

- K

=

Kuivien tilojen pinta-ala seinien sisäpinnasta
- M

=

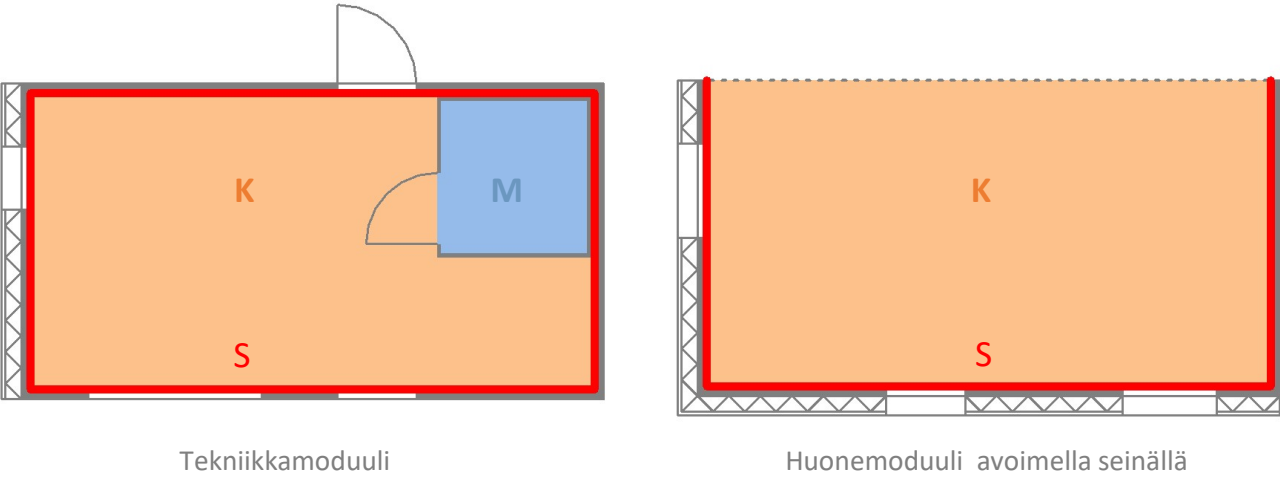
Märkätilojen pinta-ala
- S

=

CLT-seinien yhteenlaskettu pituus seinien sisäpinnasta, aukot mukaan lukien
- H

=

Kerroskorkeus



7. ASUNTOPOHJIEN MUODOSTAMINEN

Tilaelementtiasunto muodostuu yleensä yhdestä tai kahdesta tilaelementistä. Ääniteknisistä syistä samaan tilaelementtiin ei sijoiteta kahden eri asunnon tiloja. Tilaelementtijaolla ja toistuvuudella on olennainen merkitys tilaelementtikerrostalon kustannustehokkuuteen, joten tilaelementtijaon peruseriaate on syytä sisäistää heti luonnossuunnittelun alusta lähtien. Tilaelementtijaon lähtötiedoksi tarvitaan tilaelementin sopiva maksimikoko. Lisäksi asuntopohjien muodostamisessa tulisi pyrkiä mahdollisimman korkeaan esivalmistusasteeseen ja pieneen paikallarakentamisen osuuteen. Talotekniset ratkaisut tulisi suunnitella siten, että ne pystytään asentamaan mahdollisimman valmiiksi jo tehtaalla. Taloteknisten ratkaisujen korkealla esivalmistusasteella on merkittävä vaikutus tilaelementtikerrostalon kilpailukykyiseen toteutettavuuteen ja arkkitehti pystyy vaikuttamaan siihen ennen kaikkea märkätilojen, keittiön ja hormien tarkoituksenmukaisella sijoittelulla.

TILAELEMENTTIJAKO

Tilaelementtijaolla tarkoitetaan tässä sitä, kuinka moneen tilaelementtiin asunnot ja kerrospohja on jaettu, mikä on tilayksiköiden koko ja kuinka paljon niissä on toistuvuutta. Tilaelementtijako kuuluu arkkitehdin suunnittelualaan ja sen onnistuminen on tärkeää, sillä siihen kytkeytyy merkittäviä kustannuksiin vaikuttavia valintoja. Kustannustehokkaan tilaelementtijaon peruseriaate on varsin yksinkertainen:

Rakennus kootaan mahdollisimman pienestä kappalemäärästä mahdollisimman samanlaisia komponentteja, joita on helppo kuljettaa ja käsitellä.

Tilaelementtijaon suunnittelussa tulee siis huomioida erityisesti seuraavat asiat:

- **Määritetään tilaelementtien sopiva maksimikoko,** jotta kuljetukset ja nostot pystytään toteuttamaan taloudellisesti.
- **Minimoidaan tilaelementtien kappalemäärä** jakamalla rakennus mahdollisimman täysikokoisiin tilaelementteihin. Jokaisesta tilaelementistä aiheutuu erilliset suunnittelu-, nosto- ja kuljetuskustannukset, joten vajaakokoisten tilaelementtien käyttö voi johtaa kustannustehottomaan ratkaisuun. Yksion rakentaminen on yllensä kustannustehokasta, sillä se pystytään rakentamaan yhdestä täysikokoisesta (30...50 m²) tilaelementistä. Samoin ison kolmion rakentaminen on tehokasta silloin, kun se muodostetaan kahdesta täysikokoisesta tilaelementistä. Sen sijaan pienen kaksion rakentaminen kahdesta pienestä tilaelementistä tai kolmion jakaminen kolmeen tilaelementtiin johtaa yleensä neliöhinnaltaan kalliimpaan ratkaisuun.
- **Maksimoidaan tilaelementtien toistuvuus.** Tilaelementtitekniikan käyttäminen ei ole mielekästä, jos sarjatuotannon mahdollisuudet jätetään hyödyntämättä. Toistuvuutta voidaan lisätä esimerkiksi toteuttamalla kaikki kerrokset samanlaisina.

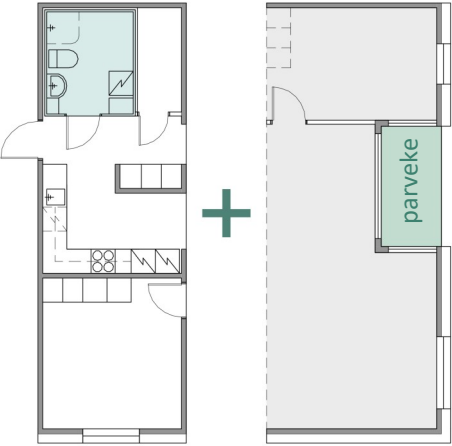
ASUNNON MUODOSTAMINEN KAHDESTA TILAELEMENTISTÄ

Tilojen sijoittelun peruseriaate on se, että kahdesta tilaelementistä koostuva asunto jaotellaan tekniikkamoduuliin ja huonemoduuliin. Tekniikkamoduulilla tarkoitetaan sellaista tilaelementtiä, johon on keskitetty märkätilat sekä suurin osa talotekniikasta. Myös keittiö sijoitetaan ensisijaisesti tekniikkamoduuliin. Tekniikkamoduuli sijoitetaan kerrospohjassa aina porrashuoneen viereen. Huonemoduuli sisältää sen sijaan vain kuivia huonetiloja. Kun talotekniikka keskitetään yhteen tilaelementtiin, saadaan tilaelementtien väliset tekniikkavedot minimoitua ja kytkennät pystytään tekemään helposti porrashuoneen puolella sijaitseviin pystynousuihin. Huonemoduulissa voidaan tilanteesta riippuen jättää tekniikkamoduulia vasten tuleva seinä avoimeksi, jolloin CLT:tä kuluu vähemmän ja huoneiston sisäisen väliseinän rakennepaksuus syö vähemmän hyötyneliöitä kuin tuplaseinäratkaisu. Alla olevissa kuvissa on esitetty erilaisia tapoja muodostaa asunto kahdesta tilaelementistä:

TEKNIKKAMODUULI HUONEMODUULI JA PARVEKE

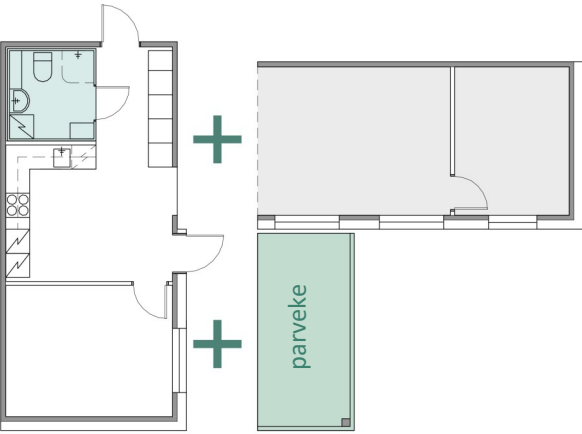
ESIMERKKIASUNTO 1:

- Huonemoduulin pitkä sivu on avoin (huomaa, että tällöin avoimella seinällä olevat kalusteet voidaan asentaa vasta työmaalla)
- Sisäänkäynti tekniikkamoduulin pitkältä sivulta
- Sisäänvedetty parveke valmiina tilaelementissä



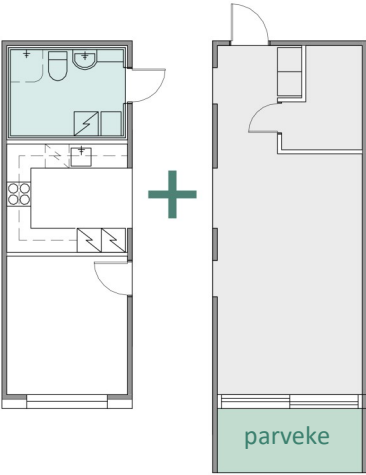
ESIMERKKIASUNTO 2:

- Huonemoduulin lyhyt sivu on avoin
- Sisäänkäynti tekniikkamoduulin lyhyeltä sivulta
- Erilliset parvekerakenteet



ESIMERKKIASUNTO 3:

- Huonemoduulin ja tekniikkamoduulin välillä on tuplaseinä
- Sisäänkäynti huonemoduulin puolelta
- Tilaelementin pääty ulokeparvekkeena



HORMIT

CLT-tilaelementtikerrostalossa talotekniikan pystynousut keskitetään porrashuoneen reunoille. Keskittäminen johtaa siihen, että hormit vievät porrashuoneen pinta-alasta varsin suuren osuuden. Hormivyöhykkeelle on syytä tehdä luonnossuunnitteluvaiheessa 300 mm:n tilavaraus porrashuoneen reunoille. Asuntojen sisäisiä hormoneja ei tulisi tehdä, sillä CLT-lattian läpi menevät ratkaisut alentavat olennaisesti tilaelementtien esivalmistusastetta ja heikentävät rakenteen palo- ja ääniteknistä tiiviyyttä. CLT-lattian lävistävät talotekniset ratkaisut aiheuttavat paljon työmaalla rakennettavia osuuksia ja syövät nopeasti esivalmistuksesta saatavan kustannushyödyn.

MÄRKÄTILAT

Märkätilat tulisi aina sijoittaa porrashuoneen vastaiselle seinälle suoraan hormin yhteyteen. Näin talotekniikka ja erityisesti viemärit saadaan yhdistettyä mahdollisimman lyhyillä vedoilla. Asuntosuunnittelussa tämä tarkoittaa sitä, että asunnon märkätila sijoittuu yleensä heti sisäänkäynnin viereen. Märkätilan sijoitusperiaate on merkittävä asuntosuunnittelun vapautta rajoittava tekijä, mutta se on tilaelementtikerrostalon kilpailukykyisen toteutettavuuden kannalta niin olennainen asia, että se on syytä ottaa yhdeksi asuntosuunnittelun lähtökohdaksi. Kun kylpyhuoneet toteutetaan märkätilaelementeillä, tulee pohjapiirroksen suunnittelussa huomioida märkätilaelementin rakenteiden viemä tila.

KEITTIÖ

Keittiön sijoittaminen on asunnon pohjapiirroksessa hieman vapaampaa kuin märkätilan sijoittaminen. Keittiön sijainnissa olennaista on se, että keittiön viemäri pystytään viemään hormiin ilman CLT-lattian lävistämistä, sillä lattian alapuolinen viemäri aiheuttaa paljon työmaalla tehtäviä työvaiheita. CLT-lattian alapuoliseen asennukseen saattaa johtaa se, että viemäriä ei pystytä piilottamaan esim. kiintokalusteiden sokkeleihin tai viemärireitti muodostuu niin pitkäksi, ettei lattiapinnan yläpuolinen tila riitä kaatojen toteuttamiseen.

Seuraavalla sivulla olevassa kuvassa on esitetty kolme vaihtoehtoa keittiön viemärireitille:

1. Vaihtoehto

Keittiön viemäri yhdistetään suoraan porraskäytävän hormiin. Tämä on helpoin ja lyhin tapa toteuttaa keittiön viemäri.

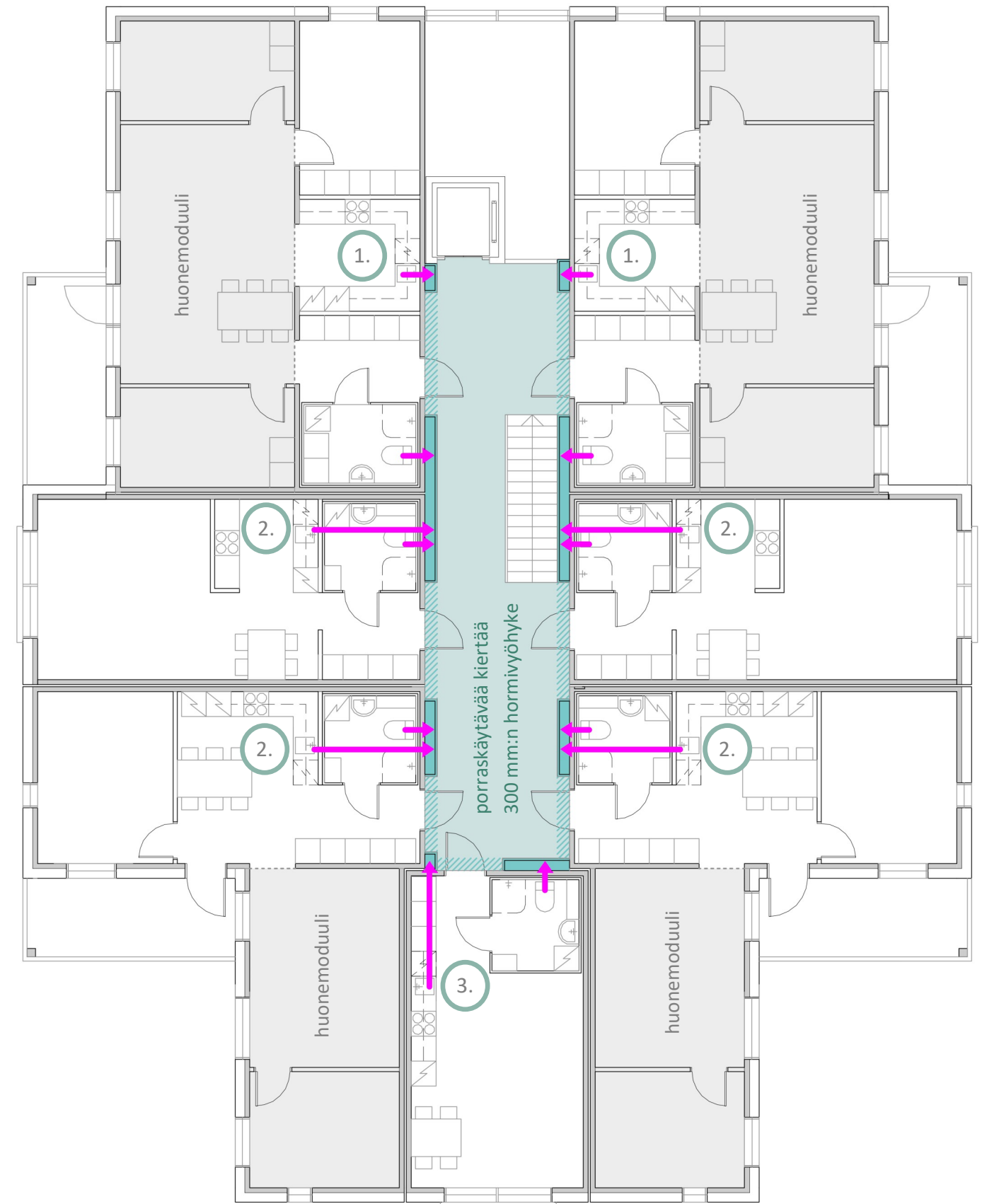
2. Vaihtoehto

Keittiön viemäri viedään porraskäytävän hormiin märkätilaelementin rakenteissa.

3. Vaihtoehto

Keittiön viemäri viedään porraskäytävän hormiin kiintokalusteiden sokkeleissa. Tässä tavassa on varmistettava, ettei viemärireitti muodostu liian pitkäksi.

Keittiön tulisi sijaita ensisijaisesti tekniikkamoduulin puolella, jotta moduulien välisiä talotekniikan kytkentöjä jäisi mahdollisimman vähän tehtäväksi työmaalla. Arkkitehtonisen ratkaisun vaatiessa keittiö on kuitenkin mahdollista sijoittaa myös huonemoduulin puolelle, jos siitä aiheutuvat kustannukset ovat hyväksyttäviä ja viemäri pystytään viemään hormiin riittävän lyhyttä reittiä lattian yläpuolisena asennuksena.



8. KERROSPOHJIEN MUODOSTAMINEN

Rakennusrunkoon kohdistuu vaakasuuntaisia kuormia, joista Suomen olosuhteissa merkittävin on tuuli-kuorma. Rakennusrungon on oltava riittävän jäykkä, jotta tuulikuorma ei aiheuttaisi rakennukseen huojumista, liian suuria muodonmuutoksia, rakenteiden murtumista tai koko rakennuksen kaatumista. Kevyt rakennusrunko reagoi tuulikuormaan herkemmin kuin painava rakennusrunko, mistä johtuen puukerrostalon jäykistyksen suunnittelu on usein haastavampaa kuin saman kokoluokan betonikerrostalon.

CLT-tilaelementtikerrostalossa jäykistysuunnittelun haastetta lisää se, että akustisten vaatimusten vuoksi tilaelementtejä ei voi kiinnittää toisiinsa täysin jäykästi ja liitosten välissä käytettävät ääneneristyskumit lisäävät rakennusrungon löysyyttä. Jotta rakennusrunko kestäisi vaakakuormien aiheuttamat rasitukset ja haitallinen huojunta saataisiin estettyä, on rakennusrungossa oltava riittävästi jäykistäviä rakenteita. Rakennuksen jäykistyksen voi toteuttaa monella eri periaatteella, mutta tässä ohjeessa keskitytään ainoastaan tilaelementtien jäykistävästä CLT-seinistä ja välipohjatasoista muodostuvaan jäykistävään runkoon.

JÄYKISTYKSEN HUOMIOIMINEN KERROSPOHJASSA

Jäykistävän rungon geometria ja aukotus vaikuttavat olennaisesti jäykistyksen onnistumiseen. Koska rakennusrungon yleismuodon ja aukotuksen määrittely kuuluu arkkitehdin suunnittelualaan, olisi arkkitehdin hyvä ymmärtää, minkälaiset ratkaisut helpottavat rakennuksen jäykistystä. CLT-tilaelementtikerrostalossa jäykistys on otettava yhdeksi kerrospohjan suunnittelua ohjaavaksi tekijäksi, sillä ilman sen huomioimista varsinkin korkeampien puukerrostalojen toteutettavuus muodostuu vaikeaksi.

Jäykistyksen kannalta hyvässä kerrospohjassa toteutuvat seuraavat ominaisuudet:

- **Jäykistäviä seiniä on riittävästi sekä rakennuksen leveys- että pituussuunnassa.** Erityisesti pitkiä jäykistäviä seiniä tulisi löytyä rakennuksen molemmista pääsuunnista.
- **Jäykistävät seinät on aseteltu tarkoituksenmukaisesti kerrospohjaan.** Sijoittelun merkitys kasvaa, mitä korkeammasta rakennuksesta on kyse.
- **Jäykistävien seinien aukotus pidetään rajoitettuna.** Jäykistävien seinien tulisi olla mahdollisimman umpinaisia, joten ne tulisi sijoittaa sellaisiin kohtiin, joissa ei tarvita suuria ikkuna- ja oviaukkoja.

Jäykistäviksi seiniksi voidaan valita sekä kantavia että ei-kantavia CLT-seiniä, mutta kantavat seinät ovat tähän tarkoitukseen parempia. Käytännössä jäykistäviksi seiniksi joudutaan kuitenkin aina ottamaan myös ei-kantavia tilaelementin lyhyitä sivuja. Ei-kantavien seinien yhteydessä on huomioitava, että jäykistävien seinälinjojen tulee osua joka kerroksessa päällekkäin samalla tavalla kuin kantavien seinälinjojenkin.

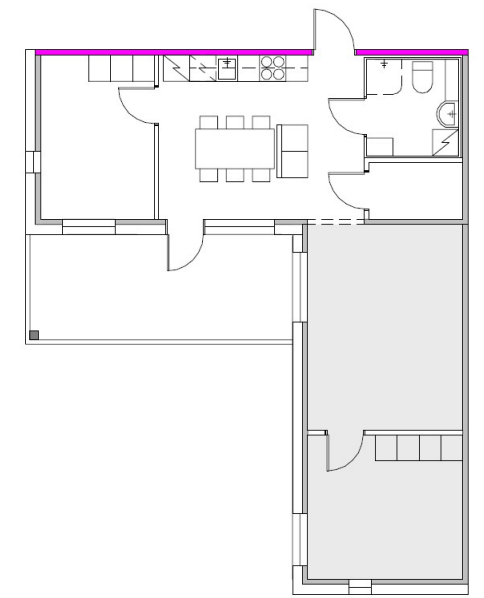
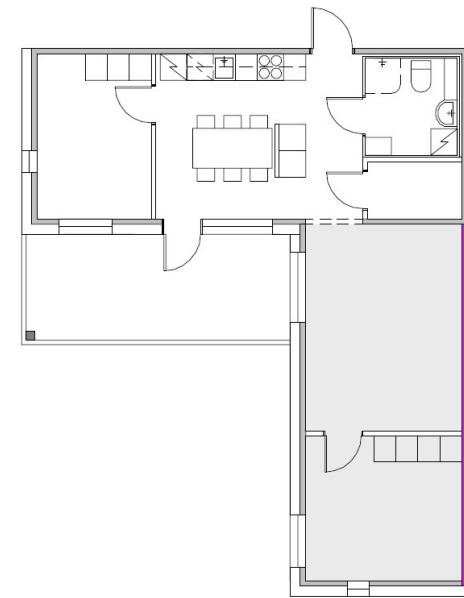
Rakennesuunnittelija olisi hyvä ottaa suunnitteluun mukaan jo mahdollisimman varhain, jotta kerrospohjan jäsentely saataisiin rakenteellisesti toimivaksi heti alusta lähtien. Suunnittelutyön edetessä on myös tärkeää keskustella rakennesuunnittelijan kanssa, mikäli aukkojen sijaintiin, kokoon tai seinien geometriaan halutaan tehdä muutoksia.

JÄYKISTÄVIEN SEINIEN VALINTA

Tässä ohjeessa annetaan suuntaviivoja siihen, millaisia seiniä kannattaa valita jäykistäviksi seiniksi. Jäykistävät seinät on tässä ohjeessa jaettu kahteen eri tyyppiin:

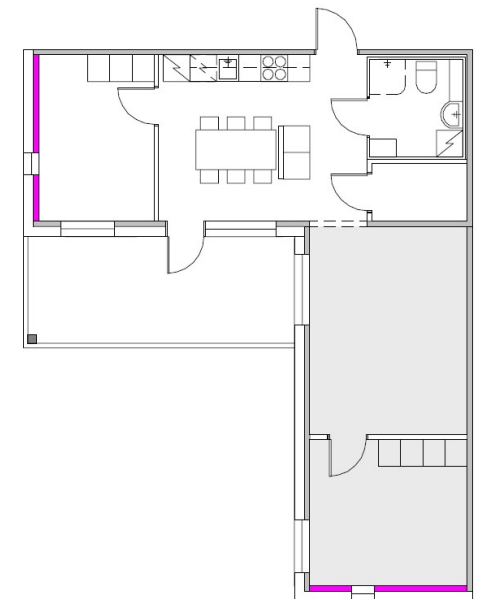
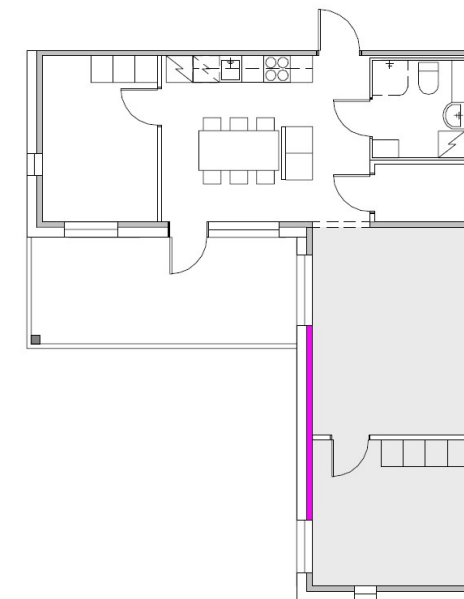
TYYPPI A:

- Tilaelementin pidemmän sivun seinät, joissa ei ole aukkoja
- Tilaelementin pidemmän sivun seinät, joissa on yksi oviaukko



TYYPPI B:

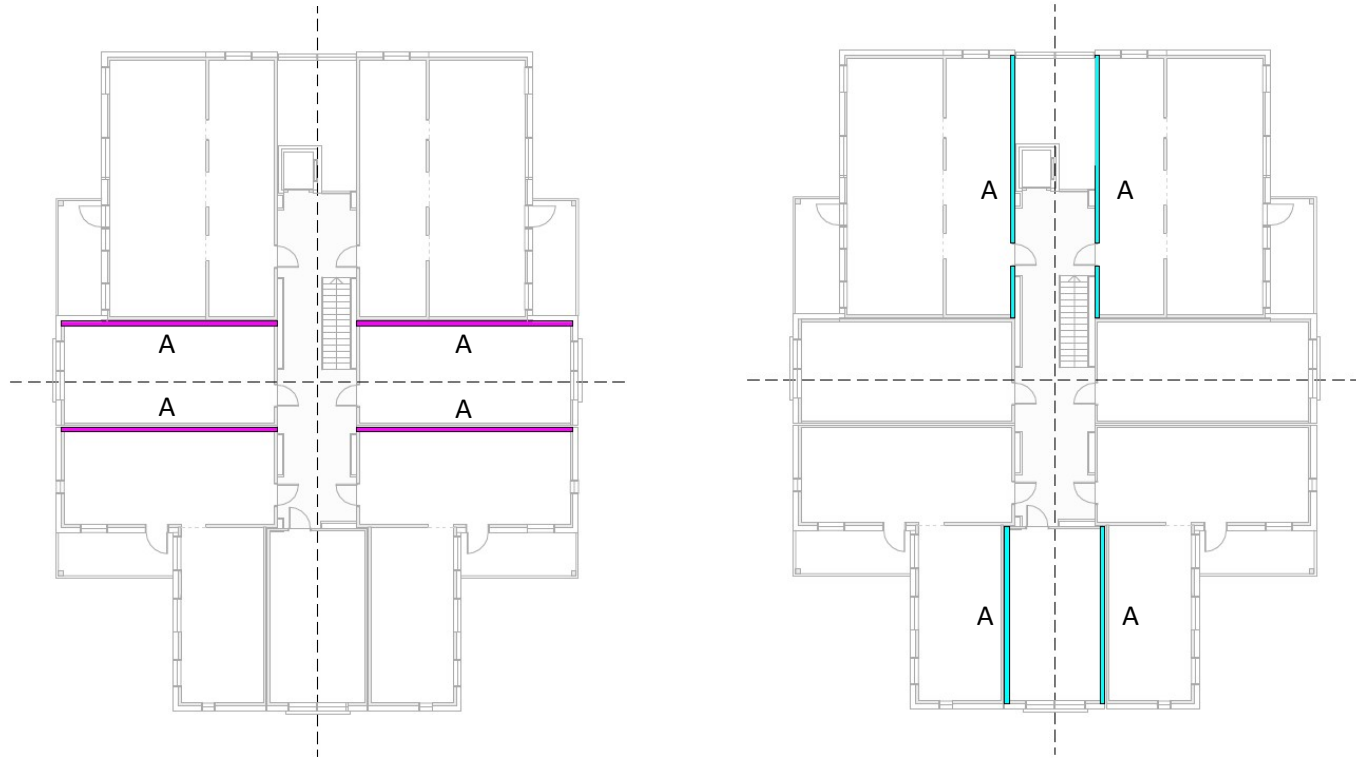
- Vähintään n. 4 metriä pitkät umpinaiset seinät tai seinäosuudet joko tilaelementin lyhyemmällä tai pidemmällä sivulla
- Tilaelementin pidemmän tai lyhyemmän sivun seinät, joissa on rajoitetun kokoisia aukkoja



JÄYKISTÄVIEN SEINIEN SIOITTELU

Jäykistysjärjestelmän symmetrisyys pienentää rakennusrunkoon aiheutuvia vääntörasituksia. Siksi olisi hyvä, että jäykistäviä seiniä olisi rakennuksen molemmissa pääsuunnissa tasapainoisesti keskilinjan molemmin puolin. Jäykistysjärjestelmän luonnostelua voi helpottaa piirtämällä molempien pääsuuntien keskilinjat apuviivoiksi. Erityisesti pitkien jäykistävien seinien olisi syytä sijaita mahdollisimman symmetrisesti keskilinjan suhteen.

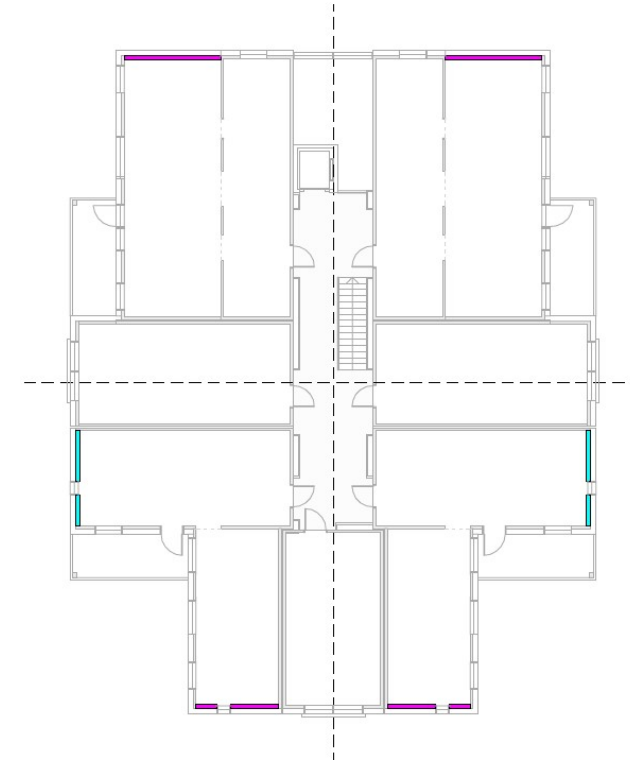
- Rakennus suunnitellaan siten, että tyyppin A seiniä on rakennuksen molemmissa pääsuunnissa.



- Tyyppin A seiniä täydennetään tyyppin B seinillä siten, että jäykistäviä seinälinjoja on molemmissa suunnissa 1-2 tilaelementin välein.

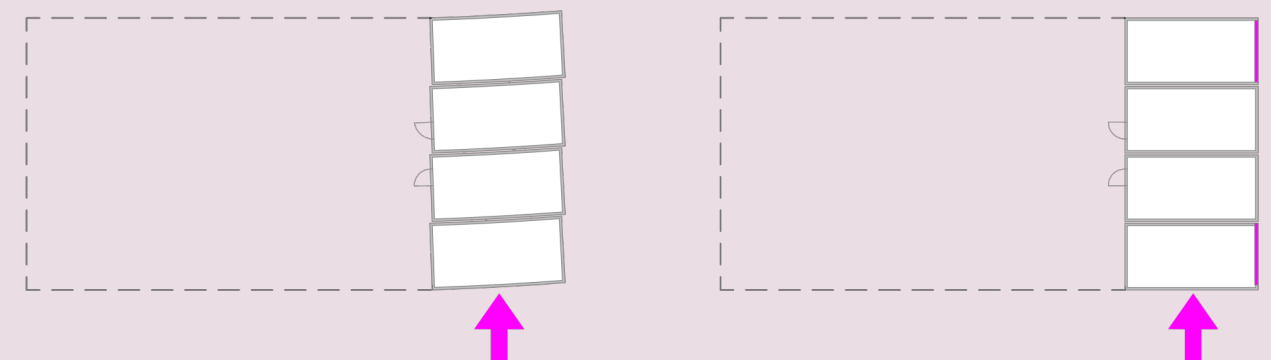


- Jäykistäviä seiniä sijoitetaan mahdollisimman lähelle rakennuksen ulkoreunoja - mieluiten rakennuksen molemmissa pääsuunnissa, mutta vähintään rakennuksen lyhyemmän sivun suuntaisesti.



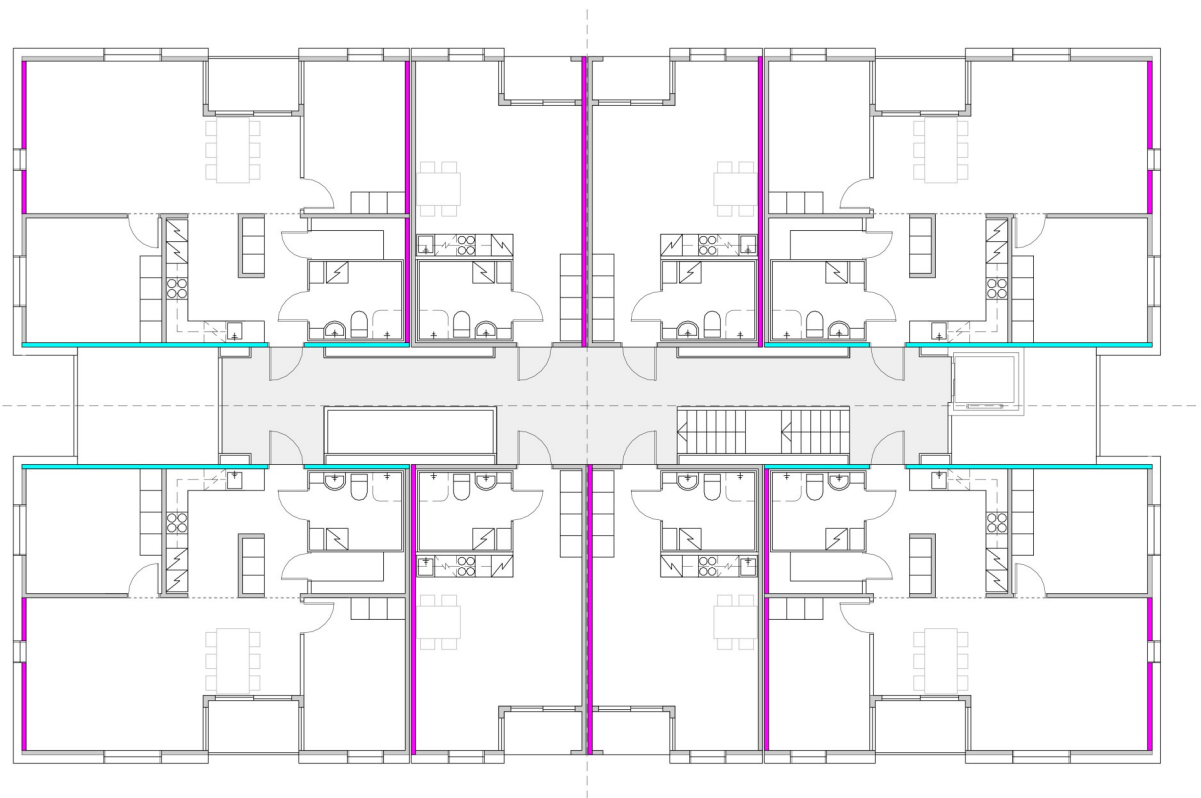
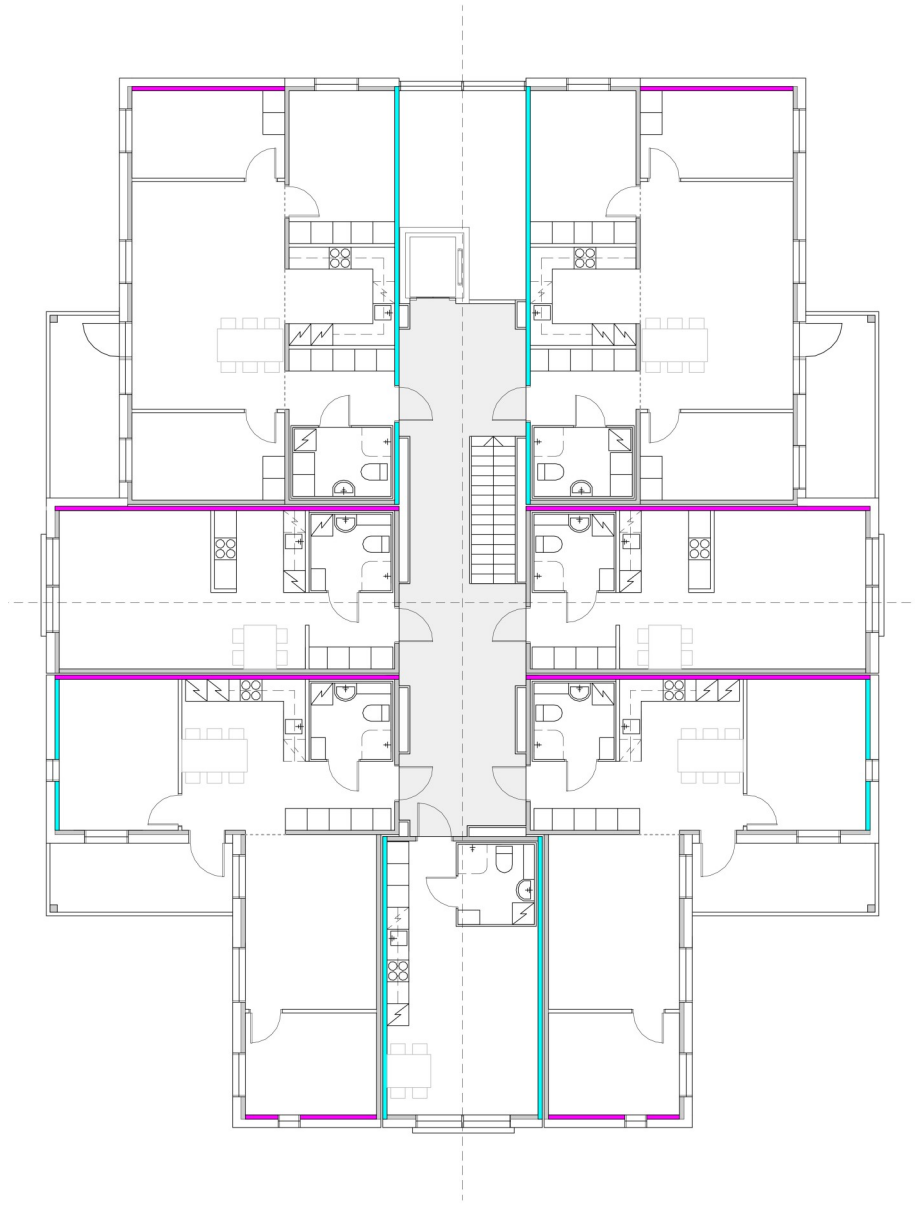
SAMANSUUNTAISET TILAELEMENTIT RAKENNUKSEN PÄÄDYSSÄ

Tilaelementtikerrostalon kerrospohjassa tulee usein vastaan alla olevan kuvan mukainen tilanne, jossa rakennuksen päädyssä kaikki rinnakkaiset tilaelementit ovat samansuuntaisia. Tällöin tuulen aiheuttama vaakasuuntainen siirtymä voi kasvaa suureksi. Tällaisessa tilanteessa rakennuksen päätyyn tulee järjestää jäykistäviä seiniä, jotka pitävät päädyn paikallaan.



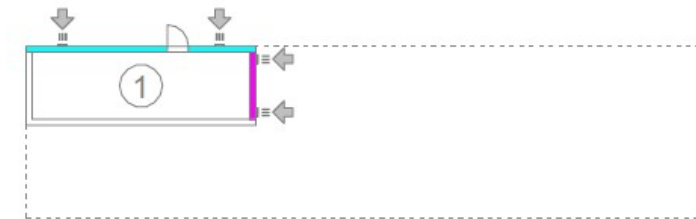
ESIMERKKIKERROSTALOT

Jäykistävien seinien sijoittelua kerrospohjassa on tässä havainnollistettu kahden esimerkkikerrostalon avulla. Rakennuksen keskilinjat molemmissa pääsuunnissa on esitetty katkoviivoilla.

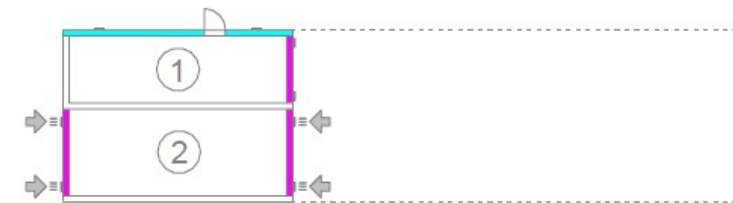


ASENNUSJÄRJESTYKSEN VAIKUTUS JÄYKISTÄVIEN SEINIEN VALINTAAN

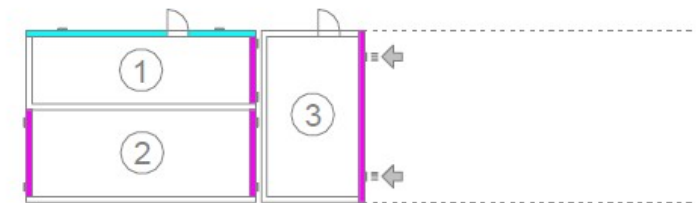
Jotta päällekkäiset seinät pystyisivät toimimaan yhtenäisinä jäykisteinä, ne täytyy kiinnittää toisiinsa teräsosilla kerrosten välillä. Tilaelementtien asennusjärjestys vaikuttaa kuitenkin siihen, mitkä seinät pystytään kiinnittämään toisiinsa. Kahden tilaelementin väliin jäävään rakoon ei mahdu asentamaan liitososia jälkikäteen, joten kunkin seinän liitososat täytyy kiinnittää ennen viereisen tilaelementin asentamista. Tämä johtaa siihen, että teräsosat pystytään kiinnittämään vierekkäisistä seinistä ainoastaan toiseen, jolloin vain tämä seinä pystyy toimimaan jäykistävänä seinänä. Asennusjärjestyksen vaikutusta esimerkkikerrostalon jäykistävien sienien valintaan on havainnollistettu alla olevassa kuvasarjassa. Jäykistävät seinät on korostettu värillä.



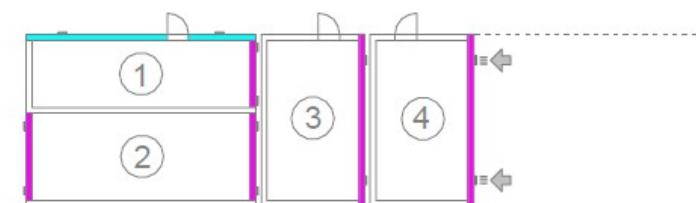
1. TILAELEMENTIN ASENNUS



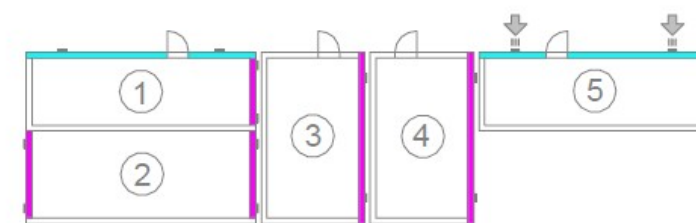
2. TILAELEMENTIN ASENNUS



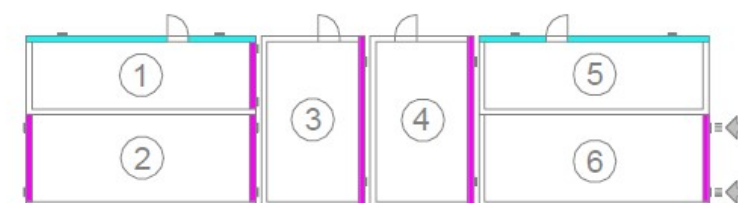
3. TILAELEMENTIN ASENNUS



4. TILAELEMENTIN ASENNUS



5. TILAELEMENTIN ASENNUS



6. TILAELEMENTIN ASENNUS

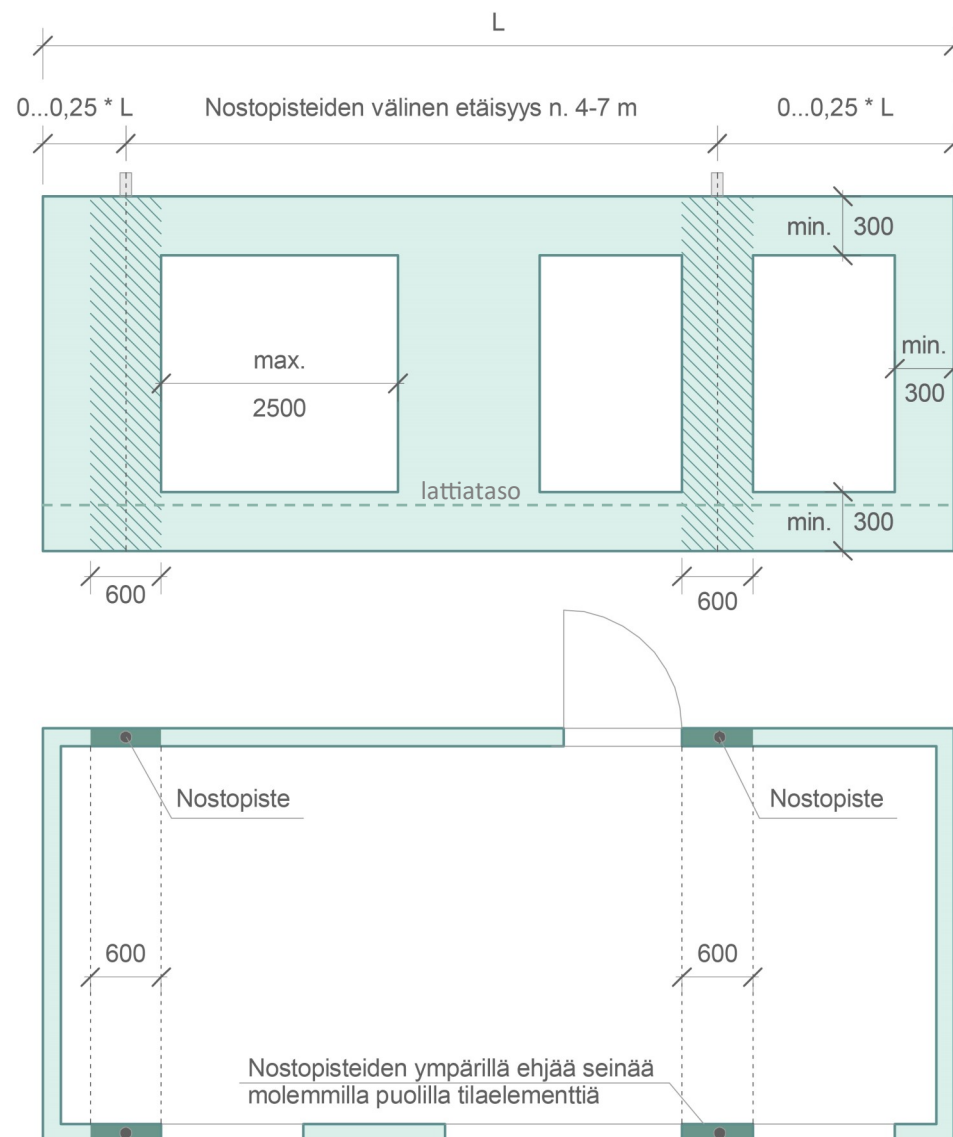
9. AUKOTUS

CLT-materiaali antaa mahdollisuuden työstää ja aukottaa levyjä mitä erilaisimpiin muotoihin. Arkkitehtuurin lisäksi aukotuksen koolla ja sijoittelulla on monenlaisia vaikutuksia rakenteen kestävyys. Aukotuksessa on huomioitava aukkojen ylä- ja alapuolelle jäävien CLT-palkkien riittävä korkeus aukon kokoon nähden, aukkojen väliin jäävien seinäosuuksien kestävyys, jäykistävien seinien riittävä jäykkyys sekä aukkopalkkien kestävyys tilaelementin nostossa. Lisäksi aukkojen sijoittelussa tulee huomioida se, että tilaelementin nostopisteet on mahdollista sijoittaa tarkoituksenmukaisiin kohtiin.

KANTAVIEN SEINIEN AUKOTUS (tilaelementtien pitkät sivut)

Kantavissa CLT-seinissä aukkojen ylä- ja alapuolelle olisi hyvä jäädä vähintään 300 mm CLT:tä. Aukkoja ei tule sijoittaa aivan CLT:n reunaan, vaan aukon ja reunan väliin tulisi jättää vähintään 300 mm CLT:tä. Noin 2500 mm leveiden aukkojen toteutus onnistuu vielä kohtuullisen helposti, mutta sitä suuremmat aukot voivat vaatia ylä- ja alapuolelle suuremmat aukkopalkit tai muita lisävahvistuksia. Tilaelementtien lyhyet sivut ovat ei-kantavia, joten niissä aukotuksen koolla ei ole rajoitteita, paitsi jos kyseessä on jäykistävä seinä. Ei-jäykistävällä tilaelementin lyhyellä sivulla CLT-seinä on mahdollista jättää myös kokonaan pois ja korvata esimerkiksi lasiseinärakenteella.

Tilaelementti nostetaan yleensä neljästä nostopisteestä, kuten sivun 21 kuvasta voidaan nähdä. Nostopisteet eivät saisi osua aukkojen kohdalle. Arkkitehtisuunnitelmassa tulisi siis huomioida se, että nostopisteet on mahdollista sijoittaa ehjien seinäosuuksien kohdalle. Nostopisteiden kohdalla tulisi olla ehjää seinää n. 600 mm tilaelementin molemmin puolin. Lyhyet tilaelementit voidaan useimmiten nostaa nurkkapisteistään, mutta optimaalisimmat sijainnit ovat yleensä 1-3 metrin päässä tilaelementin nurkista.



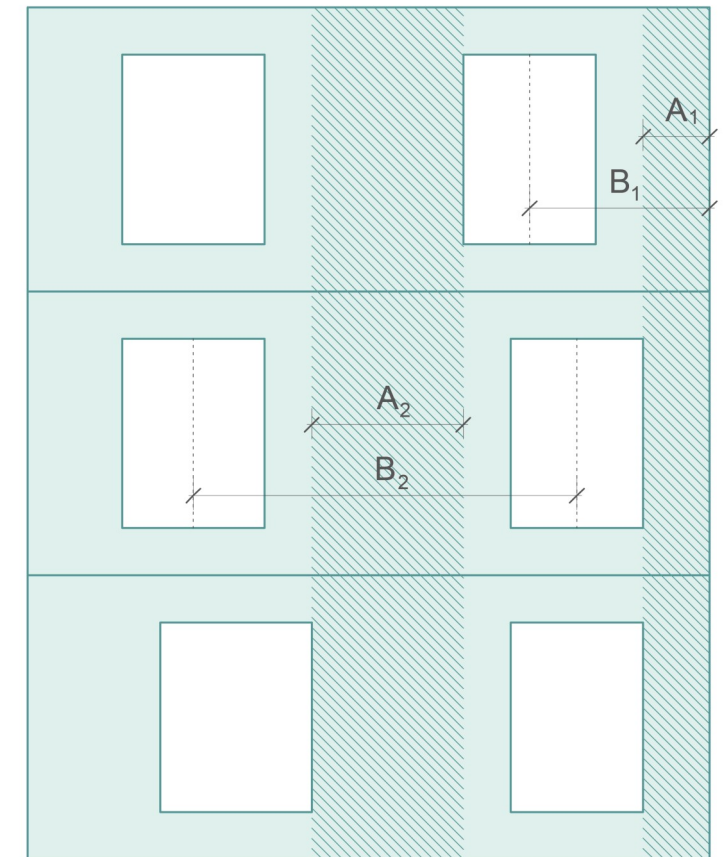
AUKKOJEN ETÄISYYS REUNOISTA JA TOISISTAAN

Kun suunnitellaan aukkojen sijoittelua kantaviin seiniin, tulee huomioida aukkojen etäisyys CLT-levyn reunoista ja toisistaan. Aukkojen väliin jäävien umpinaisten seinäosuuksien tulee olla riittävän leveitä, jotta kantavat seinät pysyvät välittämään kuormat perustuksille. Oheisessa kuvassa on havainnollistettu, miten umpinaisten seinäosuuksien olisi hyvä olla jatkuvia ylhäältä alas asti. Alla olevilla kaavoilla voi suuntaa antavasti arvioida, kuinka leveä umpiseinä tarvitaan suhteessa aukkojen keskilinjojen väliseen etäisyyteen.

3—4 puukerrosta: $A = 0,20 * B$

5—6 puukerrosta: $A = 0,30 * B$

7—8 puukerrosta: $A = 0,40 * B$



A_1 = Aukon ja reunan väliin jäävän yhtenäisen umpiseinän leveys

B_1 = Aukon keskilinjan etäisyys reunasta

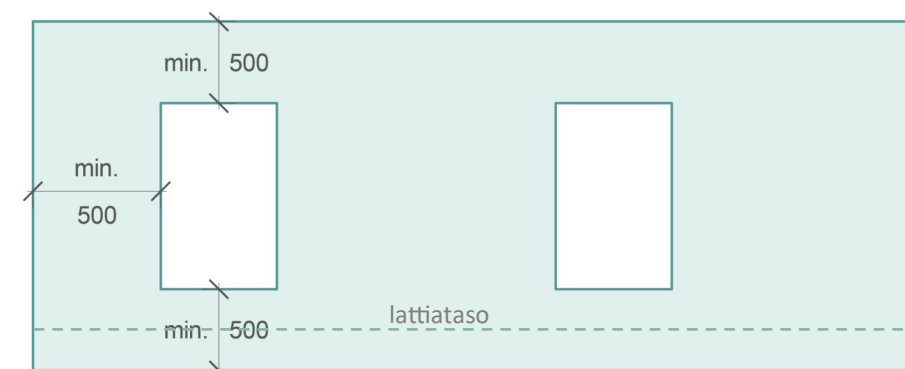
A_2 = Aukkojen väliin jäävän yhtenäisen umpiseinän leveys

B_2 = Aukkojen keskilinjojen välinen etäisyys

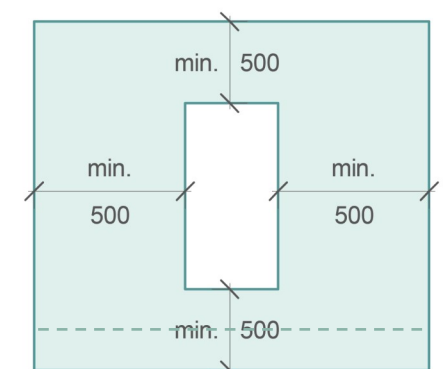
JÄYKISTÄVIEN SEINIEN AUKOTUS

Jäykistävät seinät pyritään valitsemaan siten, että niissä ei olisi aukkoja, sillä aukot heikentävät jäykistävän seinän kestävyttä ja vaikeuttavat rakenneanalyysia olennaisesti. Mikäli aukkoja täytyy sijoittaa jäykistäviin seiniin, niiden määrä ja koko olisi hyvä pitää mahdollisimman rajoitettuna. Aukot tulisi sijoittaa mahdollisimman kauas CLT-levyn reunoista ja toisistaan. Pitkissä jäykistävissä seinissä suosituksena on korkeintaan kaksi aukkoa ja lyhyissä yksi aukko. Aukon koon olisi hyvä olla enintään $1,5-2\text{m}^2$.

Tilaelementin pitkä sivu



Tilaelementin lyhyt sivu



10. JULKISIVUT

Puukerrostalon julkisivuverhouksen materiaalin pystyy valitsemaan varsin vapaasti. Lautaverhouksen lisäksi julkisivuissa voidaan käyttää esimerkiksi kuitusementti- tai rappauslevyjä. Julkisivurakenteen tulee kuitenkin mukautua rakennusrungon painumiseen, mikä on huomioitava esimerkiksi muurattujen julkisivujen suunnittelussa. Vaikka vaihtoehtoja on paljon, on suomalaisessa puukerrostalorakentamisessa kuitenkin koettu luontevana ja asiaan kuuluvana se, että puurunkoisen rakennuksen pääasiallisena julkisivumateriaalina on puuverhous. Laajojen julkisivupintojen suunnitteleminen puusta on kuitenkin arkkitehtonisesti haastavaa. Tehtaalla valmiiksi asennettu julkisivu vaatii suunnittelulta ja toteutukselta suurta mittatarkkuutta sekä saumadetaljien huolellista suunnittelua. Oman lisänsä puukerrostalojen julkisivusuunnitteluun tuovat myös verhouksen pitkäaikaiskestävyys, huollettavuus ja paloturvallisuus.

PUUJULKISIVUN ULKONÄKÖ JA PITKÄAIKAISKESTÄVYYS

Julkisivun säänkestävyydellä voi olla olennainen vaikutus rakennuksen arkkitehtoniseen ilmeeseen. Yksi puukerrostalojen julkisivusuunnittelun haaste on se, että korkeassa rakennuksessa pitkätkään räystäät eivät riitä antamaan rakenteellista suojaa kosteusrasitusta vastaan koko julkisivun matkalle. Kosteus- ja lämpötilavaihtelujen lisäksi UV-säteily tuo puujulkisivulle rasitusta, jonka voimakkuus riippuu ilmansuunnasta.

Arkkitehti pystyy vaikuttamaan julkisivun kestävyteen ja ulkonäön säilymiseen valitsemalla riittävän paksun verhouslaudan ja sopivan pintakäsittelyn sekä huomioimalla suunnitelmassa julkisivun rakenteellisen suojauksen. Eri-tyisesti vaaleissa kuultokäsittelyissä on riskinä verhouksen epätasainen tummuminen eri tavalla rasitettujen kohtien välillä. Esimerkiksi säälle alttiina oleva julkisivupinta voi muuttaa väriään verrattuna katoksen alla suojassa olevaan verhoukseen. Varsinkin kattopintaa tai maanpintaa lähellä oleva verhouksen alareuna on vaarassa tummua suuremman kosteusrasituksen myötä. Suunnitelmassa tulisi huomioida se, että verhousta ei ulotettaisi liian alas tällaisissa kohdissa. Myös verhouslautojen päiden suojaaminen pellityksillä, tippanokilla ja jatkosten välttämällä on tärkeää.

Erilaisten verhouslautojen ja pintakäsittelyjen laaja valikoima antaa monia mahdollisuuksia arkkitehtuurin luomiseen. Monesti puun halutaan näyttävän puulta ja sen vuoksi värimaailma on usein luonnonläheinen. Kuultokäsittely jättää puun vivahteikkaan kuviollisuuden näkyviin ja tuo pinnalle luonnonmukaisen ulkonäön, mutta sen ongelmana on kuitenkin pitkäaikaiskestävyys ja peittomaalausta lyhempi huoltoväli. Peittomaalaus onkin yleensä kuultokäsittelyä varmempi valinta.

Puujulkisivujen suunnittelussa tulee myös huomioida mahdollinen palosuojakäsittelyn tarve maantasokerroksessa tai parvekkeissa. Palosuojakäsittelyn aiheuttamat pinnan värimuutokset saattavat tulla esiin erityisesti kuultokäsittelyjen kanssa, joten mahdolliset sävy- ja tummuuserot eri pintojen välillä tulee ottaa suunnittelussa huomioon.

Pitkäikäisen julkisivun tunnusmerkkejä:

- Riittävän paksu ulkoverhouslauta (> 25 mm)
- Hyvälaatuinen ja riittävän kuiva puutavara
- Paksu ja tiheä kiinnityskoolaus
- Tarkoituksenmukaiset kuumasinkityt liittimet
- Oikein valittu ja toteutettu pintakäsittely
- Rakenteellinen suojaus: pitkät räystäät, verhouksen alareunan riittävä etäisyys maasta ja vaakapinoista
- Verhouslautojen päiden suojaaminen: suoja- pellitykset, tippanokat, jatkosten välttäminen
- Verhouksen tarkastaminen, huoltaminen ja korjaaminen riittävän usein



ESIVALMISTETTU VAI PAIKALLA RAKENNETTU JULKISIVU?

Tilaelementtitekniikan luonteeseen kuuluu pyrkimys mahdollisimman korkeaan esivalmistusasteeseen. Kustannustehokkaimpaan ratkaisuun päästään yleensä silloin, kun julkisivuverhous tehdään mahdollisimman valmiiksi tilaelementteihin jo tehtaalla. Tällöin työmaalla tehtäväksi jää vain saumojen viimeistely. Korkean esivalmistusasteen saavuttamiseksi paikalla rakennettava julkisivu ei siis ole suositeltava, mutta joskus se saattaa olla arkkitehtonisista syistä perusteltu. Kuvassa paikalla rakennettua saumatonta puujulkisivua As. Oy Jyväskylän Puukuokka 1:stä.

TILAELEMENTTIEN VÄLISET SAUMAT

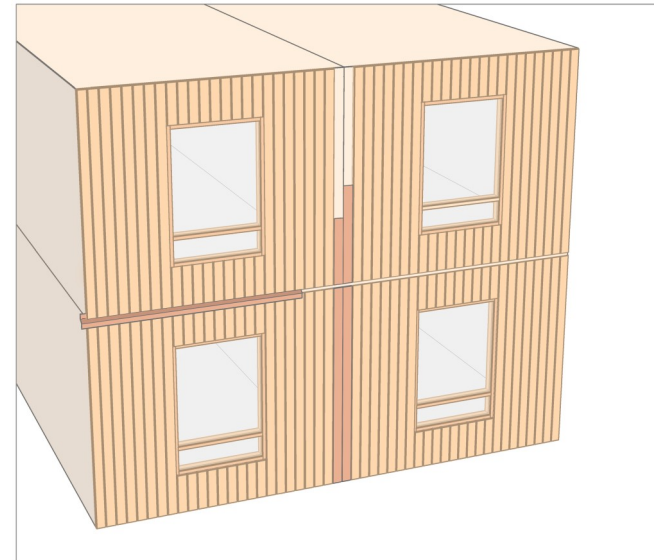
Onnistuneen lopputuloksen saavuttamiseksi arkkitehdilla olisi hyvä olla jo luonnossuunnitteluvaiheessa näkemys siitä, millä tavalla tilaelementtien väliset saumat ratkaistaan. Tilaelementtien välisiin saumoihin voidaan ottaa kolme erilaista lähestymistapaa:

- Julkisivuverhous tehdään joko osittain tai kokonaan paikalla rakentaen, jolloin tilaelementtien väliset saumat jäävät kokonaan peittoon.
- Saumakohtat häivytetään visuaalisesti julkisivusommittelun keinoin esimerkiksi sijoittamalla sauma julkisivumateriaalin vaihtumiskohtaan, parvekkeen reunaan (1) tai julkisivun nurkkakohtiin (2)
- Saumakohtat viimeistellään näkyvillä listoilla tai pellityksillä ja otetaan osaksi talon arkkitehtuuria (3)



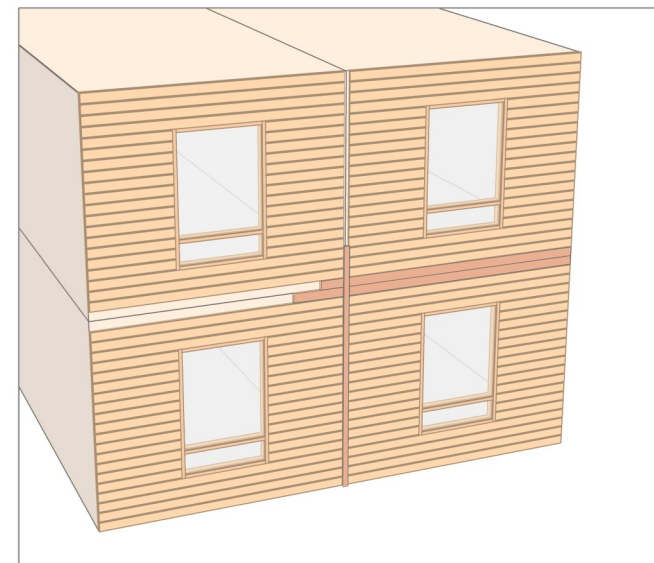
VERHOUKSEN SUUNNAN VAIKUTUS

Julkisivulaudoituksen suunnalla on vaikutusta siihen, kuinka näkyviä saumoista muodostuu. Oheisissa kuvissa on havainnollistettu, millä tavalla verhouksen suunta vaikuttaa saumojen näkymiseen julkisivupinnassa.



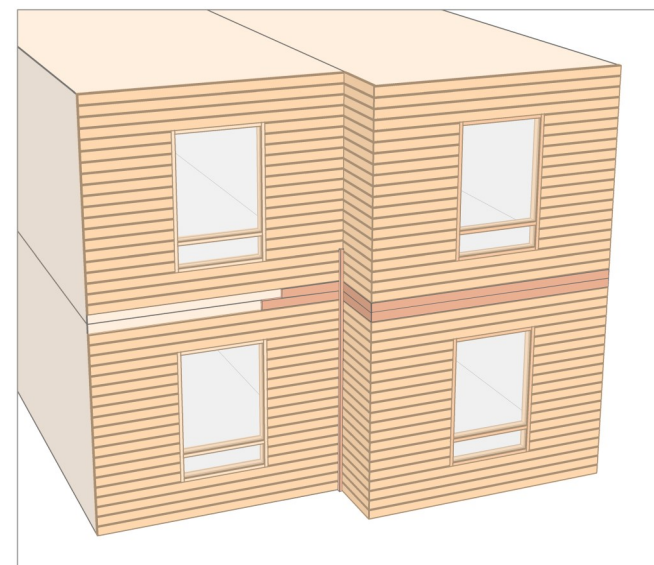
SAUMAT PYSTYVERHOUKSESSA

Jos tilaelementtien verhous on pystysuuntainen, jätetään pystysaumasta muutama verhouslauta työmaalla asennettavaksi, jolloin ei jää näkyvää pystysaamaa. Vaakasauma viimeistellään listalla tai pellityksellä.




SAUMAT VAAKAVERHOUKSESSA

Jos tilaelementtien verhous on vaakasuuntainen, saadaan vaakasauma piilotettua työmaalla asennettavien verhouslautojen taakse. Sen sijaan pystysaumaan tulee näkyvä sauma, joka voidaan peittää listalla.



SAUMOJEN HÄIVYTTÄMINEN

Saumot voidaan häivyttää myös julkisivusommittelun keinoin. Kuvassa tilaelementtien välinen pystysauma on häivytetty sijoittamalla se tilaelementtien väliseen sisänurkkaan.

The background of the entire page is a detailed architectural floor plan of a building, showing various rooms, corridors, and structural elements. The plan is rendered in a light gray line style. In the foreground, there is a large, light-colored wooden structure, possibly a model or a part of a building, featuring several circular and rectangular cutouts. The text is overlaid on a semi-transparent orange rectangular box in the upper left quadrant.

Tämä suunnitteluohje perustuu Senni Sorrin diplomityöhön *CLT-tilaelementtikerrostalon rakennussuunnitteluohjeistus*. Diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan koulutusohjelmaan.

Työn rahoittajina ovat toimineet Rakennustietosäätiö RTS ja Sweco Rakennetekniikka Oy.

© Senni Sorri 2017